



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Doctoral Thesis

**AN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF
HYGROTHERMAL BEHAVIOUR OF AN OPEN-JOINT
VENTILATED FAÇADE IN NORTHWEST IBERIAN PENINSULA**

Patricia Alonso-Alonso

2017

RD 1393/2007: Arquitectura y Rehabilitación

Director: D. Joaquín Fernández Madrid

Tutor: D. Joaquín Fernández Madrid

Esta página está en blanco intencionadamente



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Doctoral Thesis

**UN ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DEL
COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO DE UNA FACHADA
VENTILADA DE GRANITO EN EL NOROESTE PENINSULAR
IBÉRICO**

Patricia Alonso-Alonso

2017

RD 1393/2007: Arquitectura y Rehabilitación

Director: D. Joaquín Fernández Madrid

Tutor: D. Joaquín Fernández Madrid

Esta página está en blanco intencionadamente

D. **Joaquín Fernández Madrid**, Catedrático de Universidad en el área de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de A Coruña, perteneciente al Departamento de Construcciones Arquitectónicas

CERTIFICA

Y hace constar a los efectos oportunos que el documento con título **“An experimental and numerical study of an open-joint ventilated façade in northwest Iberian peninsula”** ha sido realizado por Dña. Patricia Alonso-Alonso, bajo mi dirección, y cumple los requisitos de Tesis para optar al grado de Doctor con mención Internacional por la Universidad de A Coruña

A Coruña, de de 2017

Fdo:

Prof. Doctor D. Joaquín Fernández Madrid

Esta página está en blanco intencionadamente

Tribunal nombrado por el Mgfco. Y Exmo Sr. Rector de la Universidad de A Coruña, el día
de de 2017

Presidente D./Dña.

Vocal D./Dña.

Secretario D./Dña

Suplente D./Dña

Suplente D./Dña

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 2017, en la Escuela
Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de A Coruña

Calificación

PRESIDENTE

VOCAL

SECRETARIO

Esta página está en blanco intencionadamente

*Dedicado a
Javier y Daniel*

Esta página está en blanco intencionadamente

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento a las instituciones y personas que a lo largo de este recorrido me han acompañado.

Al *Fraunhofer Institute for Building Physics*, en particular al área de higrotérmica dirigida por Harting M. Kunzel por haberme facilitado gratuitamente el uso del software Wufi Pro 5.3 con el que he trabajado en esta tesis.

Al Prof. Doctor D. Vasco Peixoto de Freitas de la *Universidade de Porto* y director del Laboratorio de Física de las Construcciones por acogerme durante un tiempo entre los suyos. Gracias por su aportación en la visión de mi investigación y por su contagioso entusiasmo, dedicación y disponibilidad.

A la dirección de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura por facilitar el uso de las instalaciones para la realización de las monitorizaciones de la fachada ventilada que se presentan.

A la dirección de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica por su apoyo incondicional.

Al Prof. Doctor D. Joaquín Fernández Madrid por la paciencia infinita que ha tenido conmigo durante todos estos años.

Al resto de personas no nombradas que, durante este largo camino, contribuyeron en algún momento a la investigación.

A mi padre por legarme esa inquietud por descubrir y conocer, por su inestimable soporte para dar forma y construir esa idea, por recordarme en ese duro y difícil camino los valores de perseverancia y determinación en conseguir este objetivo.

..Y finalmente a mi familia, por todo ese tiempo que les he robado...

.....A todos ellos gracias.

Esta página está en blanco intencionadamente

RESUMEN

En la construcción arquitectónica española, la solución de fachada ventilada se advierte como una tipología ideal. Sin embargo, el clima es diverso. Estudios indican que la fachada ventilada es una solución óptima para climas cálidos, debido a la refrigeración provocada por el tiro de ventilación de la cámara de aire. Sin embargo, no se deja claro la ventaja de esta solución para climas húmedos y con altas precipitaciones.

La tesis elige el clima del noroeste peninsular ibérico con un tipo de fachada muy común allí (ventilada con aplacados de granito y juntas abiertas). La investigación procede a analizar el comportamiento higrotérmico y de calor mediante una monitorización en la orientación Norte. Seguidamente se realizan análisis de sensibilidad sometiendo a simulación el cerramiento. Finalmente se comparan los resultados obtenidos por simulación con los de monitorización, y de ahí se extraen recomendaciones de diseño para mejorar su comportamiento.

Se concluye que, en climas como el de A Coruña (clasificación Köppen-Geiger: Csb), para orientación norte, la cámara de aire de la fachada no mejora el comportamiento higrotérmico, ni tampoco el energético.

Palabras clave: Fachada ventilada, comportamiento higrotérmico, termofluxómetros, humedad

RESUMO

Na construção arquitectónica espanhola, a solução das fachadas ventiladas é considerada como uma tipologia ideal. No entanto, o clima é bastante diversificado. Diferentes estudos indicam que a fachada ventilada é uma solução óptima para climatologías temperadas devido à refrigeração provocada pelo tiro de ventilação da câmara de ar. Por outro lado, não fica perfeitamente esclarecida a vantagem desta solução para climatologías húmidas e com alto índice de precipitações.

A presente tese selecciona o clima do noroeste peninsular ibérico com o tipo de fachada muito comum na zona de estudo (ventilada com lajes de granito e juntas abertas). A investigação procede a analisar o comportamento higrotérmico e de calor mediante a monitorização da orientação norte. Seguidamente realizaram-se análises de sensibilidade com simulações da envolvente dos edifícios. Finalmente os resultados obtidos por simulação são comparados com os obtidos na monitorização, obtendo assim recomendações de desenho para melhorar o comportamento das ditas envolventes.

Conclui-se que em climatologías tipo as da Corunha (classificação Köppen-Geiger: Csb), para a orientação norte, a câmara de ar da fachada não consegue melhorar o comportamento higrotérmico, nem o energético.

Keywords: Fachada ventilada, comportamento higrotérmico, termofluxómetros, humidade.

RESUMO

Na construción arquitectónica española, a solución de fachada ventilada advírtese como unha tipoloxía ideal. Sen embargo, o clima é diverso. Estudos indican que a fachada ventilada é unha solución óptima para climas cálidos, debido á refrixeración provocada polo tiro de ventilación da cámara de aire. Sen embargo, non se deixa claro a vantaxe desta solución para climas húmedos e con altas precipitacións.

A tese elixe o clima do noroeste peninsular ibérico cun tipo de fachada moi común alí (ventilada con aplacados de granito e xuntas abertas). A investigación procede a analizar o comportamento higrotérmico e de calor mediante unha monitorización na orientación Norte. Seguidamente realízanse análisis de sensibilidade sometendo á simulación o cerramento. Finalmente compáranse os resultados obtidos por simulación cos de monitorización, e de ahí extraense recomendacións de deseño para mellorar o seu comportamento.

Conclúese que, en climas como o de A Coruña (clasificación Köppen-Geiger: Csb), para orientación norte, a cámara de aire da fachada non mellora o comportamento higrotérmico, nin tampouco o enerxético.

Palabras chave: Fachada ventilada, comportamento higrotérmico, termofluxómetros, humidade

ABSTRACT

Open-joint ventilated façade are raised as an ideal typology at Spanish architectural construction. However, climate is diverse. Studies recommend ventilate façade being as an optimal solution for mild climates, due to the fact of cooling caused by thermal buoyancy inside the air cavity. It is no clear the advantage of this solution for humid climates and high rainfalls.

This thesis selects a northwest Iberian peninsula climate with a type of façade very common there (open joint and ventilated with granite finishing). Research tries to analyze higrothermal and heat behavior by a north façade monitorization. Also, sensibility analyses are performed. Finally, results obtained by simulation are compared by monitorization, and in order to improve its behavior, design recommendations are extracted.

It conclusion, for climate analyzed as A Coruña (Köppen-Geiger classification: Csb) for north orientation, air cavity does not improve higrothermal behaviour, nor energetic behaviour as well.

Keywords: Ventilated façade, higrothermal behaviour, heat flux meters, humidity

**UN ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO
HIGROTÉRMICO DE UNA FACHADA VENTILADA DE JUNTAS ABIERTAS EN EL
NOROESTE PENINSULAR IBÉRICO**

**AN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF HYGROTHERMAL BEHAVIOUR
OF AN OPEN-JOINT VENTILATED FAÇADE IN NORTHWEST IBERIAN PENINSULA**

I. INTRODUCCIÓN.....	1
I. INTRODUCTION	
I.1 ALCANCE DEL TRABAJO	
I.1 SCOPE OF THE WORK	
I.2 INTERÉS, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DE LA TESIS	
I.2 INTEREST, HYPOTHESIS AND OBJECTIVES OF THIS DOCTORAL THESIS	
I.3 METODOLOGÍA EMPLEADA Y LÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN	
I.3 RESEARCH METHODOLOGY	
I.4 ORGANIZACIÓN Y ESTRUCTURA DEL TEXTO. EL CONTENIDO DE LA TESIS	
I.4 ORGANIZATION AND TEXT STRUCTURE. CONTENT OF THE THESIS	
II. ESTADO DEL ARTE.....	11
II.1 VARIABLES DEL CONOCIMIENTO.....	14
II.1.1 Climáticas o ambientales	
II.1.2 Caracterización higrotérmica de materiales y transferencia de calor	
II.1.3 Constructivo-arquitectónicas	
II.2 MARCO NORMATIVO NACIONAL E INTERNACIONAL PARA EL DISEÑO.....	65
II.2.1 Marco nacional	
II.2.2 Marco internacional	
II.3 ESTUDIOS EXISTENTES SOBRE LA FACHADA VENTILADA.....	98
II.3.1 Comportamiento higrotérmico	
II.3.2 Comportamiento energético	
II.4 SÍNTESIS CRÍTICA DEL CAPÍTULO II.....	124
II.4 CRITICAL SYNTHESIS OF CHAPTER II	

III. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DEL TRABAJO.....	127
III.1 APROXIMACIÓN HOLÍSTICA.....	130
III.1.1 Introducción	
III.1.2 Preguntas e hipótesis de investigación	
III.2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	134
III.2.1 Monitorización higrotérmica.	
III.2.2 Monitorización del flujo de calor	
III.2.3 Modelo numérico de simulación	
III.3 ANÁLISIS DE DATOS.....	173
III.4 RESUMEN DEL CAPÍTULO III.....	178
III.4 SUMMARY OF CHAPTER III	
IV. RESULTADOS DE MONITORIZACIÓN “ <i>IN SITU</i> ”	179
IV.1 MONITORIZACIÓN HIGROTÉRMICA.....	181
IV.1.1 Monitorización térmica	
IV.1.2 Monitorización hídrica	
IV.2 SOLICITACIONES HÍDRICAS SOPORTADAS.....	204
IV.2.1 Presión de vapor de agua	
IV.2.2 Movimiento de difusión de vapor de agua a través del cerramiento	
IV.3 MEDICIÓN DE TEMPERATURAS SUPERFICIALES Y DENSIDAD DE TASA DE FLUJO DE CALOR.....	221
IV.3.1 Temperaturas superficiales	
IV.3.2 Densidad de tasa de flujo de calor	
IV.4 TRANSMITANCIA TÉRMICA U.....	238
IV.5 SÍNTESIS CRÍTICA DEL CAPÍTULO IV	247
IV.5 CRITICAL SYNTHESIS OF CHAPTER IV	

V. RESULTADOS DE ANÁLISIS NUMÉRICO DE SIMULACIÓN.....	251
V.1 CARACTERIZACIÓN DE LA FACHADA VENTILADA DE GRANITO.....	253
V.1.1 Comportamiento térmico	
V.1.2 Comportamiento hídrico y del flujo de calor	
V.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LAS CONDICIONES AMBIENTALES.....	271
V.2.1 Influencia del clima	
V.2.2 Influencia de la orientación	
V.2.3 Influencia de la lluvia incidente	
V.2.4 Influencia del contenido de humedad relativa ambiental en el flujo de calor latente	
V.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LOS MATERIALES COMPONENTES.....	291
V.3.1 Influencia del espesor y posición del aislamiento térmico	
V.3.2 Influencia del espesor y grado de ventilación de la cámara de aire	
V.3.3 Influencia del espesor del aplacado exterior de granito	
V.3.4 Influencia de la composición de los materiales del cerramiento y su humedad relativa inicial	
V.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL FLUJO Y TIEMPO DE SECADO.....	315
V.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN EL MARCO NORMATIVO ESPAÑOL.....	319
V.6 SÍNTESIS CRÍTICA DEL CAPÍTULO V.....	328
V.6 CRITICAL SYNTHESIS OF CHAPTER V	
VI. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MONITORIZACIÓN Y ANÁLISIS NUMÉRICO.....	331
VI.1 VERIFICACIÓN DE PROCESOS Y ENSAYOS.....	333
VI.1.1 Contraste de pruebas en los sensores utilizados	
VI.1.2 Influencia del procedimiento de monitorización del flujo de calor	
VI.1.3 Sensibilidad de los parámetros introducidos en el análisis numérico	
VI.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	353
VI.2.1 Ambiente	
VI.2.2 Flujo de calor	
VI.2.3 Transmitancia térmica	

VI.3 SÍNTESIS CRÍTICA DEL CAPÍTULO VI.....	367
VI.3 CRITICAL SYNTHESIS OF CHAPTER VI	
VII. DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES DE DISEÑO.....	371
VII.1 COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO.....	373
VII.1.1 Ambiente	
VII.1.2 Procesos de secado y mojado en el cerramiento	
VII.1.3 Flujo de calor y transmitancia térmica	
VII.2 MÉTODO Y NORMATIVA.....	392
VII.2.1 Instrumentación, procedimiento e incertidumbre	
VII.2.2 Normativa aplicada	
VII.3 PARÁMETROS QUE INFLUENCIAN.....	398
VII.3.1 Parámetros sensibles	
VII.3.2 Recomendaciones al prescriptor en el proceso de diseño	
VII.4 SÍNTESIS CRÍTICA DEL CAPÍTULO VII.....	404
VII.4 CRITICAL SYNTHESIS OF CHAPTER VII	
VIII. CONCLUSIONES.....	407
VIII.CONCLUSIONS	
VII.1 CONCLUSIONES GENERALES.....	409
VII.1 GENERAL CONCLUSIONS	
VII.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.....	411
VII.2 SPECIFIC CONCLUSIONS	
VII.3 RECOMENDACIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	413
VII.3 FINAL RECOMMENDATIONS AND NEW FUTURE RESEARCH TRENDS	
IX. BIBLIOGRAFÍA.....	417

NOMENCLATURAS Y ACRÓNIMOS

Notaciones con letras romanas

A	$[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}^{0.5}]$	Coefficiente de absorción de agua
A	$[\text{m}^2]$	Área
a	$[\text{m}^2/\text{s}]$	Difusividad térmica
b	$[\% \text{M.} - \%]$	Suplemento de conductividad térmica debido a la humedad
c	$[\text{J}/\text{kg K}]$	Calor específico o capacidad térmica específica
D_ϕ	$[\text{kg}/\text{m s}]$	Coefficiente de conducción líquida
e	$[\text{m}]$	Espesor
ef	$[\text{W s}^{0.5}/\text{m}^2 \text{K}]$	Efusividad térmica
E	$[\text{J}]$	Energía
F_T	$[-]$	Coefficiente de conversión de temperatura
F_m	$[-]$	Coefficiente de conversión de humedad
F_a	$[-]$	Coefficiente de conversión por envejecimiento
F_i	$[-]$	Coefficiente de corrección por masa interior
F_e	$[-]$	Coefficiente de corrección por masa exterior
g_v	$[\text{kg}/\text{m}^2 \text{s}]$	Densidad de flujo de masa (difusión de vapor)
g_w	$[\text{kg}/\text{m}^2 \text{s}]$	Densidad de flujo de masa (agua líquida)
H	$[\text{J}]$	Entalpía
HR	$[\%]$	Humedad relativa
h_{conv}	$[\text{W}/\text{m}^2 \text{K}]$	Coefficiente de transferencia de calor por convección
h_l	$[\text{J}/\text{kg}]$	Calor latente
j	$[-]$	Índice de cada observación
m	$[\text{kg}]$	Masa o peso
p_c	$[\text{Pa}]$	Presión capilar
p_v	$[\text{Pa}]$	Presión de vapor de agua
p_{sat}	$[\text{Pa}]$	Presión de vapor de agua de saturación
Q	$[\text{W}]$	Flujo de calor

q	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Densidad de tasa de flujo de calor
q_c	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Densidad de tasa de flujo de calor por conducción
q_f	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Densidad de tasa de flujo de calor de transporte de agua líquida
q_{diff}	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Densidad de tasa de flujo de calor de difusión de vapor de agua
q_{lat}	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Densidad de tasa de flujo de calor latente (cambios de estado)
R	$[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$	Resistencia térmica
R_v	$[\text{J}/\text{Kg K}]$	Constante de gas del vapor de agua
R^2	$[-]$	Coefficiente de determinación. Valor estadístico
r	$[-]$	Coefficiente de Pearson. Valor estadístico
R_d	$[\text{°}]$	Radio de curvatura
S_d	$[\text{m}]$	Espesor de cámara de aire equivalente
S_{td}	$[-]$	Desviación estándar
S_h	$[\text{W}/\text{m}^3]$	Fuente o sumidero de calor
S_w	$[\text{kg}/\text{m}^3\text{s}]$	Fuente o sumidero de humedad
T	$[\text{K}]$ o $[\text{°C}]$	Temperatura
t	$[\text{s}]$ o $[\text{h}]$	Tiempo
U	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$	Transmitancia térmica estática en seco
U_{80}	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$	Transmitancia térmica estática al 80% de humedad relativa
V	$[\text{m}^3]$	Volumen
W	$[\text{kg}/\text{m}^2]$	Masa de contenido de agua y/o vapor por superficie
w	$[\text{kg}/\text{m}^3]$ o $[\text{g}/\text{m}^3]$	Masa de contenido de agua por volumen o humedad absoluta
w_{80}	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	Masa de contenido de agua por volumen de referencia
w_{sat}	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	Masa de contenido de agua por volumen de saturación
x	$[\text{m}]$	Distancia horizontal
Y	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$	Transmitancia térmica dinámica

Notaciones con letras griegas

α	[kg/m ² K]	Coeficiente de transferencia total de calor
β_p	[kg/m ² sPa]	Coeficiente de transferencia de vapor de agua
δ_p	[kg/msPa]	Permeabilidad al vapor de agua de un material
λ	[W/m K]	Conductividad térmica de una material
λ_o	[W/m K]	Conductividad térmica de una material seco
λ_w	[W/m K]	Conductividad térmica de un material húmedo
ε	[m ³ /m ³]	Emisividad
ξ	[m ³] o [%]	Porosidad
μ	[-]	Factor de resistencia al vapor de agua
ρ	[kg/m ³]	Densidad
σ	[W/m ² K ⁴]	Constante de Stefan Boltzmann
Υ	[N/m]	Tensión superficial
ψ	[kg/kg] o [m ³ /m ³]	Contenido de humedad
Θ	[°]	Ángulo

Símbolos matemáticos

Σ	Operador de suma
∂	Operador diferencial parcial
Δ	Operador de incremento de variable
∇	Operador diferencial vectorial

Siglas y acrónimos

ACH	Ratio de intercambio de aire de la cavidad
ADRI	Annual Driving Rain Index
AEMET	Agencia Estatal de METereología
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BRE	British Research Establishment

BS	British Standards
CSA	Canadian Standards Association
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Batiment
CTE	Código Técnico de la Edificación
CWCT	Centre for Window and Cladding Technology
DAU	Documento de Adecuación al Uso
DB	Documento Básico
DI	Drying Index
DIN	Deutsches Institut für Normung
DITE	Documento de Ideoneidad Técnico Europeo
DRWP	Driven Rain Wind Pressure / <i>Presión de viento que impulse lluvia</i>
EN	European Normalization
EOTA	European Organisation for Technical Assessment
EPBD	European Performance of Buildings Directive
ETAG	European Technical Approval Guidance
GD	Grados Día de Calefacción
HAM	Heat-Air-Moisture
HDD	Heating Degree Days
HE	Ahorro de Energía
HFS / HFM	Heat Flux Sensor
HS	Habitabilidad Salubridad
IBP	Institute of Building Physics
IEA	International Energy Agency
ISO	International Standard Organisation
MI	Moisture Index
PUR	Aislamiento de poliuretano
RIWP	Índice del Riesgo de Penetración de Agua en las Fachadas de los Edificios

UE	Unión Europea
UNE	Una Norma Española
WDR	Wind Driven Rain / <i>Lluvia incidente</i>
WI	Wetting Index
WUFI	Wärme-Und Feuchtetransport Instationär. (<i>Programa de software</i>)

INTRODUCCIÓN

“Todo nuestro conocimiento nos viene de las sensaciones”

Leonardo Da Vinci

I.1 ALCANCE DEL TRABAJO

En esta investigación se pretende conocer cuál es el comportamiento higrotérmico de una fachada ventilada de granito orientada al Norte en Galicia.

El trabajo académico presentado constituye una parte de la línea de investigación iniciada hace ya años en la Universidad de A Coruña por el profesor Doctor D. Joaquín Fernández Madrid sobre fachada ventilada de granito. En particular, y como resultado de mi participación como técnico de investigación en un proyecto de investigación de la Xunta de Galicia denominado *“Desarrollo de un tratamiento inhibidor de la colonización biológica en fachadas transventiladas de granito aplicadas por su trasdós”* PGIDIT06CCP009E quedaron líneas de investigación abiertas sobre el comportamiento térmico de las fachadas ventiladas, así como de los aspectos hídricos. Esta tesis surge de la inquietud por dar respuesta a estos ámbitos.

Este trabajo es, por tanto, un estudio para analizar el comportamiento higrotérmico del sistema constructivo de fachada ventilada de granito en este tipo de clima y poder dar pautas de predicción para un óptimo comportamiento futuro. La finalidad también es ayudar al prescriptor, normalmente arquitecto, a tomar las decisiones de forma más acertada en relación a su comportamiento higrotérmico.

A lo largo de la historia, los materiales disponibles para la construcción se han vinculado al territorio. En el Noroeste Peninsular (Galicia) existe una facilidad en la obtención del granito que ha posibilitado que la población pudiese utilizarlo como un material de construcción durante siglos. La construcción de la arquitectura tradicional gallega es fundamentalmente granítica y la ciudad de Santiago de Compostela representa claramente esta realidad.

Destacados arquitectos gallegos utilizaron este material. Ejemplos como D. Antonio Palacios (1972-1945), defensor de los materiales naturales y de su expresividad en la construcción. Realizó edificios singulares en granito como el **Círculo de Bellas Artes de Madrid** o el **Palacio de Comunicaciones** (actual sede del Ayuntamiento de Madrid). También es de destacar la figura de D. José Bar Boo (1922-1994). Este arquitecto basaba sus decisiones en el conocimiento de los canteros de las Rías Baixas. El **Policlínico Cíes** en Vigo, **Plaza de Abastos** de Gondomar (Pontevedra) o los **Juzgados de A Coruña** son algunas de sus obras más destacadas.

La **tradición** ha utilizado sistemas constructivos homogéneos y masivos. Precisamente el espesor era el que garantizaba las prestaciones necesarias. La **tecnología** constructiva evolucionó, consiguiendo que nuevos sistemas de construcción fuesen viables. Los nuevos sistemas heterogéneos y más ligeros se advertían como la solución perfecta y las normas recientes, justificaban esa nueva tecnología.

Desde los años 70, los arquitectos fueron incorporando a sus envolventes un nuevo sistema constructivo de **fachada ventilada**. El sistema no es más que una doble piel separada por una cámara de aire. La primera piel posee unas dimensiones reducidas en relación al resto del espesor del cerramiento. Su funcionamiento responde a las diferentes respuestas climáticas: *rainscreen* (pantalla) y/o *ventilada*.

El funcionamiento predominante de la fachada ventilada en los climas mediterráneos es el concepto ventilado. En este tipo de climas, la radiación solar sobre la envolvente del edificio es elevada. Se intenta reducir las altas temperaturas y refrigerar de forma natural, creando bajo la piel exterior un flujo de tiro de chimenea que rebajase las altas temperaturas. En contraposición, el concepto de pantalla "*rainscreen*" supone utilizar la envolvente principalmente como un paralluvias es decir, impedir el ingreso del agua a través de una piel exterior en la envolvente, recogiendo el agua en la cámara y expulsándola.

En el Noroeste Peninsular, el concepto paralluvias ha sido la utilización predominante. Además, la evolución tecnológica de este sistema de fachada ventilada ha sido paralela con la incorporación del granito al sistema. La **industria** de Galicia también ha contribuido con el desarrollo de la tecnología necesaria para extender este sistema constructivo particular. Empresas como Proesga SL o como Fachadas del Norte son un claro ejemplo de ello.

En España, las normas que regulan la construcción de edificios, exponen este sistema como una solución constructiva aceptable en los climas húmedos, además de ser una buena opción para su comportamiento térmico. Los arquitectos encuentran en este sistema constructivo de fachada ventilada con granito una solución constructiva ideal ya que las normas avalan la solución constructiva y existe la tecnología suficiente y disponible.

El comportamiento higrotérmico en la envolvente es una de las exigencias demandadas y son clave para el diseño, el confort y la satisfacción de individuo. Todos los sistemas constructivos deben alcanzar unos niveles óptimos que deben ser concretados.

Sin embargo, después de unos años de aplicación de este sistema constructivo y tras la aparición de mayores exigencias prestacionales en el comportamiento térmico de la

envolvente, es preciso comprobar si verdaderamente, para el clima gallego, este tipo de cerramientos se está comportando tan adecuadamente como se indica.



Figura I.1: Rúa Nova en Santiago de Compostela

La filóloga Dña. Elvira Fidalgo Francisco ha recogido en su tesis doctoral de 2012 más de cien términos para definir la lluvia en este territorio gallego. Estos términos incorporan incluso, no sólo las particularidades de la forma de llover, sino también las situaciones anímicas de los hablantes. Ejemplo de términos de lluvia menuda y fina: babuña, borralla, froallo, chuviscada, poalla, morriñada, orballo,.. Términos de lluvia fuerte: arroiada, chuveira, xistra, torbón, chaparrada, bategada, coriscada, cebrisca, corisco,.. Términos de lluvia con mucho aire: brea, zarracina, ciobra, chubascada,... Términos de lluvia mezclada con la niebla: barruzo, breca, mera, salseiro,.. Términos de lluvia mezclada con nieve: torva, cebrisco,....

Está claro que si en el lenguaje es prolífico este término, la lluvia debe estar presente en la vida del gallego. También puede deducirse lingüísticamente que este territorio posee una singularidad climática, al menos con respecto a las precipitaciones, sobre la cantidad, forma y duración.

Pero lo realmente cierto es que al final, aun teniendo esta evidente singularidad climática en Galicia e incluso con grandes diferencias con respecto a España, se utiliza una misma solución constructiva de fachada ventilada. **Así que, la pregunta siguiente sería si la solución de fachada ventilada de granito diseñada se comporta en la realidad tal y como se había pensado previamente para el clima en el que se dispone.** Lo cierto es que no se sabe, porque hasta la fecha, no se ha realizado este trabajo empírico y que demostrasen estas prestaciones reales. Estas se presuponen o se dan por resueltas en la mayoría de los casos. Los profesionales se encuentran con la incertidumbre de cuál será su comportamiento real.

I.2 INTERÉS, HIPÓTESIS Y OBJETIVO DEL TRABAJO

El prescriptor, siguiendo indicaciones, consigue cumplir las prestaciones que establecen el Código Técnico de la Edificación C.T.E. Sin embargo, pocos datos existen que recojan lo que verdaderamente está sucediendo, y los que existen fuera de este territorio, muestran una divergencia y un comportamiento peor de lo prescrito. En concreto, es necesario analizar qué está sucediendo en la realidad y en concreto en el caso de una fachada ventilada de granito en Galicia.

Si verdaderamente se conociese cual es el comportamiento higrotérmico real, podría reducirse el error considerado. Como consecuencia, se estaría mejorando los recursos materiales, económicos e incluso energéticos. Este problema es de gran relevancia en este momento, ya que se han incrementado las exigencias térmicas debido a la transposición de la Directiva Europea 2010/31/UE del Parlamento Europeo y Del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios.

Es un hecho que la reducción del consumo de energía en los edificios es una prioridad política. Esta última Directiva indicada, establece el nuevo concepto de *edificio de consumo de energía casi nulo*. Bajo esta normativa los edificios públicos de los estados miembros serán en 2019 de consumo casi nulo y para todos los edificios nuevos en 2021. No todos los países de la UE han definido todavía qué condiciones han de reunir los edificios de consumo de energía casi nulo, entre ellos está todavía España, y el valor de transmitancia térmica en la envolvente es un parámetro a definir. El reto camina hacia la construcción de edificios que funcionen sin consumir energía. Hay que actuar sobre distintos ámbitos, pero lo elemental, es actuar y controlar la envolvente del edificio.

El sistema de fachada ventilada de granito se posiciona como uno de los sistemas más eficientes para conseguir este propósito. Sin embargo está constatado por muchos autores que la humedad influye de manera determinante y negativa en el comportamiento térmico del cerramiento. En el Noroeste Peninsular gallego llueve mucho, las amplitudes térmicas son pequeñas, la temperatura es templada y la humedad relativa alta. Con estos datos, debe de ser analizado y controlado con más detalle, en el sistema de cerramiento y con la orientación más desfavorable, la influencia de la humedad en el cerramiento en todas sus fases.

En definitiva, la gran exigencia higrotérmica reciente y la carencia de datos reales del comportamiento higrotérmico en este clima de Galicia hacen evidente el **interés** de este trabajo de investigación. Además, no sólo puede ser de gran ayuda al prescriptor, sino también para el usuario final del inmueble, que tiene el derecho a conocer el consumo real de energía.

Vistos estos argumentos, el interés y para dar respuesta a la problemática, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

La **primera pregunta de investigación** cuestiona si **en el sistema constructivo de fachada ventilada analizada hay una desviación entre el valor de transmitancia térmica teórica o de cálculo (U_T) y la transmitancia térmica real (U_R)**, obtenida de medidas in-situ. Para la primera hipótesis se plantea que en el sistema concreto de fachada ventilada estudiada, las

transmitancias calculadas teóricamente (establecido por la norma) y las obtenidas de ensayos experimentales in-situ difieren de valor.

La segunda pregunta de investigación, cuestiona si, **para A Coruña, Galicia (clima clasificado Köppen Geiger: Csb), hay un aumento del valor de U_R en relación a otros climas debido a la humedad**. Es decir, en el caso concreto analizado, si hubiese una desviación de los valores de transmitancia térmica, pudiera ser debido a la humedad.

La última pregunta de investigación cuestiona si **el parámetro de la humedad ambiental es uno de los más relevantes para determinar el comportamiento higrotérmico del cerramiento para este clima**.

Todas estas preguntas de investigación anteriormente descritas, se organizan bajo un objetivo general. El **objetivo general** de esta tesis doctoral de investigación pretende analizar si la fachada ventilada de granito en orientación norte y en el clima de Galicia se comporta desde el punto de vista higrotérmico en la realidad tal y como se había predicho en un inicio, es decir, como supuestamente habían recogido las teorías y cálculos higrotérmicos y en el Código Técnico de la Edificación C.T.E.

La averiguación de este comportamiento será importante con el fin de poder diseñar más acorde con lo que en realidad sucedería, puesto que los cálculos energéticos iniciales se basan, en particular, en los valores de transmitancia térmica, propios de los cerramientos. Los valores en el DB HE-1 del C.T.E. para la provincia de A Coruña indicaban como máximo valor de U en cerramientos $0,73\text{W/m}^2\text{ K}$. En el año 2013 se producía una actualización a $0,29\text{W/m}^2\text{ K}$, lo que supone un valor mucho más exigente. Ante valores tan exigentes, es necesario analizar la transmitancia real para asegurar que se alcanzan los valores normativos. Como se observa es necesario precisar una medición, pues variaciones reducidas pueden significar una variación relevante sobre el total.

Para contestar adecuadamente las preguntas de investigación se establecen los siguientes **objetivos específicos**:

1) Recoger el conocimiento existente y analizar la normativa nacional e internacional relativa a la fachada ventilada de granito y el estado del arte de esta técnica constructiva

- 1.1 Recopilar los factores intervinientes en el comportamiento higrotérmico de una fachada
- 1.2 Analizar crítica y comparativamente las diferentes normativas internacionales en cuanto a las exigencias de cumplimiento de las prestaciones higrotérmicas para una fachada
- 1.3 Describir el estado de la cuestión del comportamiento higrotérmico y energético de una fachada ventilada

2) Elegir y describir los procedimientos para la evaluación del comportamiento higrotérmico

- 2.1 Describir el método para la obtención de datos in-situ mediante monitorización
- 2.2 Describir el método para el análisis numérico de simulación
- 2.3 Describir el procedimiento de análisis de datos y comparación de los mismos

3) Monitorizar el comportamiento higrotérmico del sistema constructivo de la fachada ventilada de granito con localización y orientación concreta

- 3.1 Describir el clima recogido en la localización de A Coruña, y en relación a los valores normales de A Coruña
- 3.2 Conocer y cuantificar, mediante la monitorización, la exposición hídrica-ambiental y la densidad de tasa de flujo de calor de la fachada ventilada real elegida
- 3.3 Correlacionar la exposición hídrica-ambiental con el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor y el conocimiento de la transmitancia térmica

4) Mediante análisis de simulación numérica estimar la variabilidad e influencia de los parámetros materiales, de diseño y ambientales sobre el comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada de granito

- 4.1 Identificar los parámetros relativamente sensibles
- 4.2 Evaluar, mediante análisis de sensibilidad, los efectos producidos por los cambios realizados sobre el sistema de cerramiento o sus condiciones de entorno
- 4.3 Analizar el proceso de mojado-secado de la fachada ventilada a lo largo del tiempo

5) Verificar y comparar los resultados térmicos e hídricos obtenidos según los métodos utilizados (monitorización y simulación)

- 5.1 Desarrollar un conjunto de pruebas de verificación y contraste alternativas que den respuesta y que argumenten los resultados obtenidos
- 5.2 Evaluar la validez de los resultados obtenidos en la monitorización higrotérmica
- 5.3 Confrontar los valores de cuantificación hídrica y de la transmitancia térmica de la fachada ventilada según los diferentes métodos utilizados y la simulación

6) Definir el comportamiento higrotérmico característico y establecer recomendaciones

- 6.1 Describir el comportamiento ambiental e higrotérmico característico observado en la fachada ventilada
- 6.2 Explicar y discutir los hallazgos más relevantes en relación a los aspectos hídricos y térmicos
- 6.3 Establecer unas recomendaciones a partir de la comparación de los resultados y los hallazgos encontrados en el comportamiento higrotérmico

En definitiva, este trabajo pretende realizar una explicación del comportamiento higrotérmico real de una fachada ventilada de granito orientada a Norte en el clima de Galicia.

I.3 METODOLOGÍA EMPLEADA Y LÓGICA INTERNA DE LA INVESTIGACIÓN

Para responder a las hipótesis y los objetivos antes descritos, se desarrolla un método de investigación que se basa en tres partes.

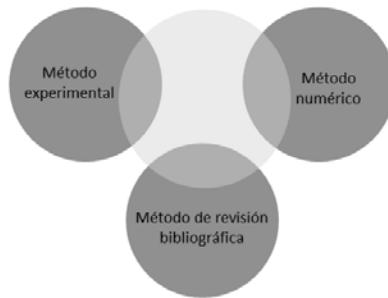


Figura I.2: Métodos utilizados en la tesis

Una **primera parte** o método de monitorización de la fachada que se desarrolla para la recogida de datos reales de la fachada. Los datos reales de temperatura y humedad ambiental, superficial e interior. Además se cuantifica el flujo de calor que pasa a través de esta fachada ventilada.

Una **segunda parte** o método de análisis numérico, donde se elige un software de análisis numérico de simulación de calor y humedad denominado *WUFI Pro 5.3* diseñado por Künzle en la Fraunhofer Institute for Building Physics en Alemania para realizar los cálculos y resultados de temperatura y humedad ambiental, superficial e interior. Además se obtiene el flujo de calor que pasa a través del cerramiento. Con estos resultados obtenidos se aplica análisis de sensibilidad para poder predecir cuál sería el comportamiento si cambian variables.

Una **tercera parte** en la que se procede a la comparación de los resultados obtenidos tanto en la monitorización in-situ como en los análisis numéricos de simulación del software Wufi Pro 5.3. Se finaliza con una discusión de los resultados, intentando verificar también la validez de los resultados.

I.4 ORGANIZACIÓN Y ESTRUCTURA DEL TEXTO. EL CONTENIDO DE LA TESIS

Contenido de la tesis

Este trabajo se divide en VIII capítulos. El **capítulo I** inicia con una introducción donde se expone la existencia de un problema en la evaluación higrotérmica de fachadas ventiladas en clima húmedo y en concreto en la determinación de la transmitancia térmica.

El **capítulo II** hace un recorrido por el estado de conocimiento y los estudios realizados que correlacionan de alguna manera con el comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada, organizándolos en tres ámbitos: climáticos, materiales y constructivo-arquitectónicos.

Los **capítulos III, IV, V, VI y VII** constituyen el cuerpo de la tesis, el **capítulo III** explica el proceso de la investigación llevado a cabo y el método seguido.

El **capítulo IV** describe los resultados obtenidos en las monitorizaciones in-situ realizadas, tanto la higrotérmica como las de densidad de tasa de flujo de calor.

El **capítulo V** expone los resultados obtenidos de los análisis de sensibilidad realizados, tanto en las condiciones ambientales exteriores, como de los materiales componentes, del marco normativo y del tiempo de secado.

El **capítulo VI** hace una comparativa entre los valores de temperatura, humedad relativa, y densidad de tasa de flujo de calor obtenidos por simulación y los obtenidos por monitorización in-situ, realizando una evaluación de la diferencia encontrada.

De los resultados y comparativa realizada, el **capítulo VII** se discuten los hallazgos más relevantes y se exponen unas recomendaciones útiles de ayuda al prescriptor. Se destacan los parámetros más significativos que influyen en este comportamiento, con el fin de ajustar al máximo el valor predicho y el valor real.

Finalmente el **capítulo VIII** muestra las conclusiones generales y específicas alcanzadas, así de las recomendaciones para las futuras investigaciones. El documento termina con las referencias y una bibliografía.

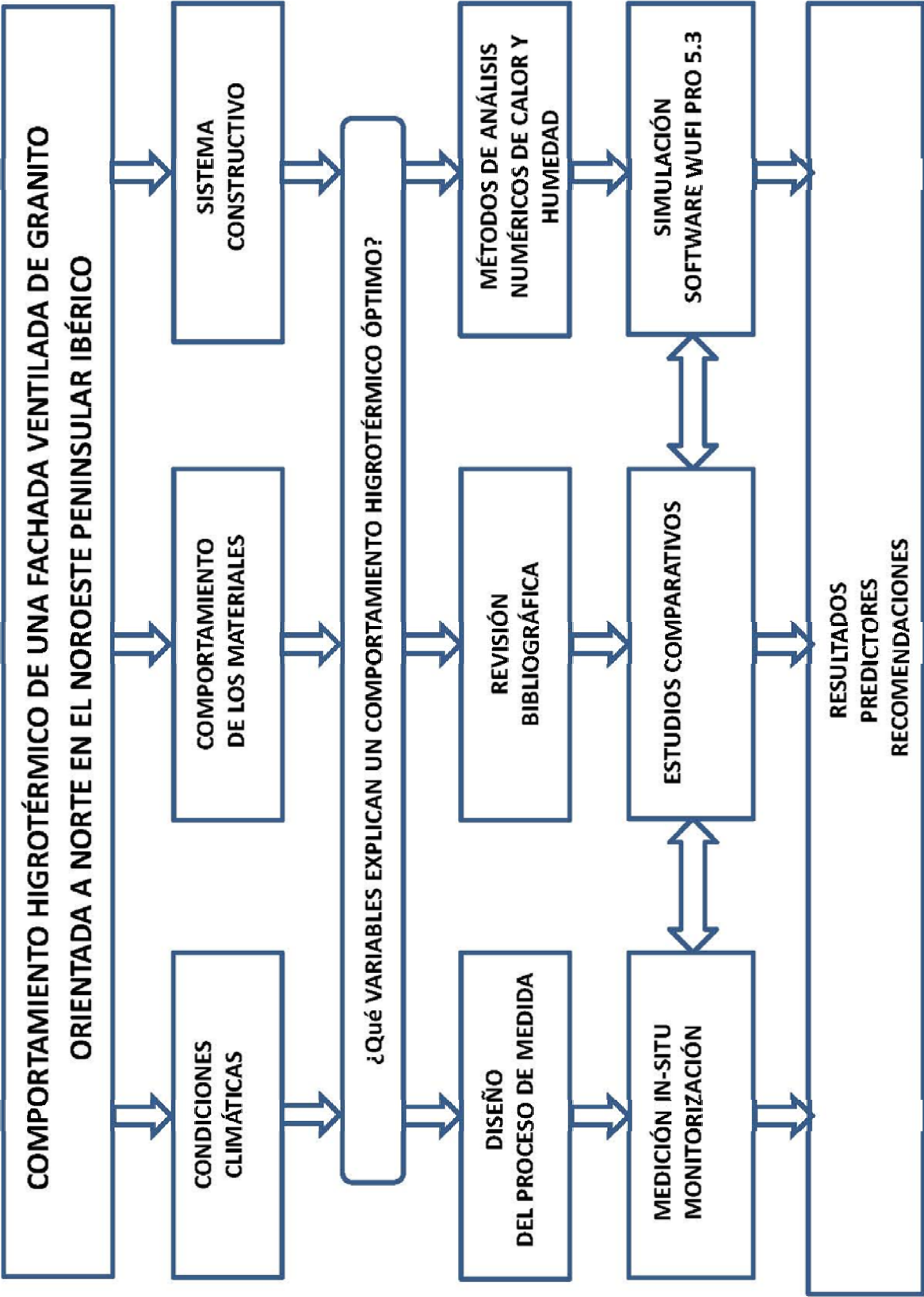


Figura I.3: Esquema conceptual de la tesis doctoral

INTRODUCTION

"All our knowledge has its origins in our perceptions"

Leonardo Da Vinci

I.1 SCOPE OF THE WORK

This research aims to know the behavior of an open-joint ventilated façade of granite facing north in Galicia

This academic work presented is part of the research line, on open-joint ventilated façade of granite, started years ago at the University of A Coruña by Professor Dr. D. Joaquín Fernández Madrid.

In particular, and as a result of my collaboration as a technician in a research project entitled *"Development of an inhibitory treatment of biological colonization in open-joint ventilated façades of granite applied to back face"* PGIDIT06CCP009E lines of research remained open about thermal behavior of open-joint ventilated façades of granite, as well as on the moisture aspects. This thesis arises from the concern to give an answer.

This work is, therefore, a study to analyze hygrothermal behavior of the constructive assembly of an open-joint ventilated façade of granite in this type of climate and to be able to give prediction patterns for an optimal future behavior. The purpose is also to help the prescriber, usually architect, to make the most accurate decisions regarding their hygrothermal behavior.

Throughout history, materials available for construction have been linked to location. In the Northwest Peninsular (Galicia), using granite as a building material was possible for centuries because obtaining granite rocks were easy. Traditional Galician architecture is fundamentally made of granite and the city of Santiago de Compostela clearly represents this reality.

Outstanding Galician architects used this material. Examples like D. Antonio Palacios (1872-1945), supporter of natural materials and their expressiveness in construction. He developed singular buildings in granite like **Círculo de Bellas Artes de Madrid** or **Palacio de Comunicaciones** (current place of Madrid City Council). It is also worth noting the figure of D. José Bar Boo (1922-1994). This architect based his decisions on the knowledge of the Rías Baixas stonemasons'. **Policlínico Cíes** in Vigo, **Plaza de Abastos** in Gondomar (Pontevedra) or **Juzgados de A Coruña** are some of his most outstanding works.

Tradition has used homogeneous and massive building envelope. Precisely thickness guaranteed necessary confort. Constructive **technology** evolved, making new constructive systems possible. New heterogeneous and lighter systems were perceived as perfect solution and recent standards and rules, justified this new technology.

Since the 70's, architects were start to use a new constructive assembly of open-joint ventilated façade. This building envelope is nothing more than a double skin separated by an air cavity. The first skin has reduced dimensions in relation to the rest of the thickness of the envelope. Its performance meets two different climatic responses: as a rainscreen (umbrella) and / or a sunscreen (ventilation).

Predominant performance of open-joint ventilated façade in Mediterranean climates is the air ventilated or "*sunscreen*" concept. In this type of climate, solar radiation on the building envelope is high. It tries to reduce high temperatures and to cool naturally, creating under the outer skin airflow buoyancy that lowers high temperatures. In contrast, "*rainscreen*" concept involves using the envelope primarily as an umbrella, preventing water from entering through an outer skin in the envelope, collecting water in the cavity and expelling it.

In Galicia, umbrella concept has been the predominant use. In addition, technological evolution of this ventilated façade system has been in parallel with the addition of granite into the system. Galician industry has also contributed to the development of the technology needed to extend this particular assembly. Firms like "Proesga SL" or like "Fachadas del Norte" are a clear example of this.

In Spain, building construction legal framework exposes this system as an acceptable constructive solution in humid climates, besides being a good option for its thermal behavior. Architects find an open-joint ventilated facade of granite an ideal solution since available technology exists and standards endorse constructive solution

Hygrothermal behavior of the envelope is one of the requirements laid down and is the key to design, comfort and satisfaction of users. All construction assemblies must achieve optimum levels that must be specified.

However, after a few years of practical use and after appearance of more demanding requirements in the thermal behavior of the envelope, it is necessary to verify if, for Galician climate, this type of envelope is actually behaving as adequately as indicated.



Figure I.1: Nova Street at Santiago de Compostela

Mrs. Elvira Fidalgo Francisco philologist has collected in her doctoral thesis of 2012 more than a hundred terms to define the rain in this Galician region. These terms incorporate not only rainfall singularity, but also psychological situations of speakers. Examples of terms of fine and small rain: *babuña*, *borralla*, *froallo*, *chuviscada*, *poalla*, *morriñada*, *orballo*, .. Terms of heavy rain: *arroiada*, *chuvieira*, *xistra*, *torbón*, *chaparrada*, *bategada*, *coriscada*, *cebrisca*, *corisco*, .. Terms of rain with a lot of air: *brea*, *zarracina*, *ciobra*, ... Terms of rain mixed with fog: *barruzo*, *breca*, *mera*, *salseiro*, ... Terms of rain mixed with snow: *torva*, *cebrisco*,

It is clear that if in the language this term is prolific, rain must be present in the life of Galician. It can also be linguistically deduced that this region possesses a climatic singularity, at least with respect to rainfall, on quantity, form and duration.

But what is really certain is that in the end, even having this evident climatic singularity in Galicia and even with great differences with respect to Spain, the same constructive solution of open-joint ventilated facade is used. So, next question would be whether ventilated facade design solution behaves in reality as previously it was thought for the climate. The truth is that it is not known, because to date, this empirical work has not been done and that these real benefits need to be demonstrated. These are presupposed or resolved in most cases. Professionals are faced with uncertainty what their real behavior will be.

I.2 INTEREST, HYPOTHESIS Y OBJECTIVE OF THE WORK

Prescriber, following instructions, manages to fulfill benefits established by Spanish Building Code C.T.E. However, few data exist what is really happening, and those that exist outside this region, show a divergence behavior than prescribed. In particular, what is happening in reality and specifically in the case of ventilated granite façade in Galicia is necessary to consider.

If one really knew what real hygrothermal behavior is, considered error could be reduced. As a consequence, material, economic and even energy resources would be improved. This problem is of great importance at this time, as the thermal requirements have been increased due to the transposition of European Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on energy efficiency of the buildings.

It is a fact that reducing energy consumption in buildings is a political priority. Last directive indicates new concept of building of nearly zero energy consumption. Under this regulation public buildings of the member states will be in 2019 nearly zero energy consumption and for all new buildings in 2021. Not all EU countries have yet defined what conditions have to meet buildings of nearly zero energy consumption. Among them is still Spain, and thermal transmittance value in the envelope is a parameter to be defined. The challenge is towards building construction that operates without consuming energy. We must act on different areas, but the basic thing is to act and control building envelope.

Open-joint ventilated granite façade system is raised as one of the most efficient systems to achieve this purpose. However it is verified by many authors that relative humidity influences in a determinant and negative way in the thermal behavior of the envelope. In Galicia it rains a lot, thermal amplitudes are small, the temperature is warm and relative humidity is high. With these data, humidity influence on the envelope in all its phases must be analyzed and controlled in more detail, in the envelope system and with the most unfavorable orientation.

In short, recent high hygrothermal requirement and lack of real data on hygrothermal behavior in this Galician climate increase interest evidence of this research work. In addition, it can not only be of great help to the prescriber, but also to the end user of the building, who has the right to know real energy consumption.

Given these arguments, the following research questions are raised:

First research question challenged whether there is a deviation between theoretical thermal transmittance U_T value and the real output of thermal transmittance U_R value, obtained from on-site measurements in an open-joint ventilated facade system analyzed. For first hypothesis, specific ventilated facade system is proposed to be studied; theoretically calculated transmittances (established by standards) and those obtained from on-site experimental tests that differ in value.

Second question asks whether, for A Coruña, Galicia (climate classified Köppen Geiger: Csb), there is an increase in the value of U_R in relation to other climates. That is, in particular case assessed, if there were a deviation from thermal transmittance values, it could be due to humidity.

Last research question rises if environmental moisture parameter is one of the most relevant to determine hygrothermal behavior of the envelope for this climate.

All of these research questions described above are organized under a general objective. The general objective of this doctoral thesis is to assess if an open-joint ventilated façade of granite in north orientation and in the climate of Galicia behaves from the hygrothermal point of view in the reality as predicted in the beginning, that is to say, as supposedly they had collected physics theories and hygrothermal calculations and at Spanish Building Code C.T.E.

Inquiry of this behavior will be important in order to be able to design more in accordance with what would actually happen, since initial energy calculations are based, in particular, on thermal transmittance. This kind of values at the DB HE-1 of C.T.E. for A Coruña indicated a maximum U value for envelopes of $0,73\text{W/m}^2\text{K}$. In 2013 an update was produced at $0,29\text{W/m}^2\text{K}$, which is a much more demanding value. At such demanding values, it is necessary to analyze real transmittance to ensure that standard values are reached. As it is observed, it is necessary to specify U-value, since small variations can involve a significant variation on the total amount.

To adequately answer research questions, following specific objectives are established:

1) Existing knowledge, national and international regulations regarding open-joint ventilated façade and the state of the art of this constructive technique will be collected

- 1.1 Factors involved in the hygrothermal behavior of a facade will be compiled
- 1.2 Different international regulations in terms of compliance of hygrothermal performance for a façade will be analyzed critically and comparatively
- 1.3 State of art of the hygrothermal and energetic behavior of an open-joint ventilated façade will be described

2) Procedures for assessment of the hygrothermal behavior will be chosen and described

- 2.1 Method for in-situ data collection through monitoring will be elaborated
- 2.2 Method for numerical simulation analysis will be stated
- 2.3 Data process analysis and data comparison will be specified

3) Hygrothermal behavior of constructive system of open-joint ventilated granite façade with concrete location and orientation will be monitored

- 3.1 Climate collected in the location of A Coruña, and in relation to the normal values of A Coruña will be described
- 3.2 Through monitoring, moisture-environmental exposure and density of the heat flow rate of ventilated façade chosen will be known and quantified
- 3.3 Moisture-environmental exposure with behavior of the heat flow rate density and knowledge of the thermal transmittance will be correlated

4) Using numerical simulation analysis, parameters on the hygrothermal behavior of an open-joint ventilated granite façade will be estimated

- 4.1 Relatively sensitive parameters will be identified

- 4.2 Through sensitivity analysis, effects produced by changes made to the envelope system or its boundary conditions will be evaluated
- 4.3 Wet-drying process of an open-joint ventilated façade over time will be analyzed

5) Thermal and hygric results obtained according to methods used (monitoring and simulation) will be verified and compared

- 5.1 A set of alternative verification and contrast tests that give answers and argue results obtained will be developed
- 5.2 Results obtained in the hygrothermal monitoring will be assessed validity
- 5.3 Confronting values of water quantification and thermal transmittance of the ventilated façade according to different methods used

6) Characteristic hygrothermal behavior and develop recommendations will be defined

- 6.1 Characteristic environmental and hygrothermal behavior observed in an open-joint ventilated façade will be described
- 6.2 The most relevant findings in relation to hygric and thermal aspects will be explained and discussed
- 6.3 Recommendations from hygrothermal behavior based on the comparison of results and findings will be developed

In short, this work intends to explain hygrothermal behavior of an open-joint ventilated façade of granite oriented to the North in the climate of Galicia.

I.3 RESEARCH METHODOLOGY

In order to answer to hypotheses and objectives described above, and based on three parts, a research method is developed.

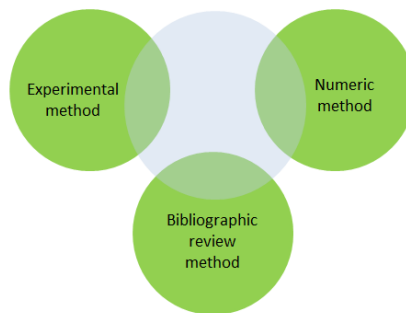


Figure I.2: Methods used at this theses

A **first part** or monitoring method is developed for collecting real data. Ambient, superficial and interior temperature and relative humidity data are extracted. Heat flux density passing through this ventilated façade is also quantified.

A **second part** or numerical analysis method, software of heat and moisture analysis is used. The name is WUFI Pro 5.3 and it is designed by Künzeli in the Fraunhofer Institute for Building Physics in Germany. It helps to run calculations and results of temperature, relative humidity and water content. In addition, a heat flow rate that passes through the envelope is obtained. With these results extracted, sensitivity analysis is applied to be able to predict what hygrothermal behavior would be if variables change.

A **third part** in which findings obtained are compared in the on-site monitoring and numerical simulation. It ends with a discussion of findings, trying to verify also validity of results.

I.4 ORGANIZATION AND TEXT STRUCTURE. CONTENT OF THE THESIS

Contents of the thesis

This paper is divided into VIII chapters. **Chapter I** begins with an introduction where it is raised a problem in the hygrothermal assessment of an open-joint ventilated façades in humid climate and particularly in the determination of the thermal transmittance.

Chapter II makes a state of knowledge of studies carried out that correlate in some way with the hygrothermal behavior of an open-joint ventilated façade, organizing them in three domains: climatic, material and architectural constructive.

Chapters III, IV, V, VI and VII represent the body of the thesis, **chapter III** explains research process carried out and the method followed.

Chapter IV describes results obtained in on-site monitoring performed, both the hygrothermal and heat flow rate.

Chapter V presents the results obtained from the sensitivity analyzes performed, both in the external environmental conditions, as well as the component materials, the regulatory framework and drying time.

Chapter VI compares the temperature, relative humidity, and density of heat flux rate values obtained by simulation and those obtained by on-site monitoring, making an assessment of deviations.

From the results and comparison made, **chapter VII** discusses the most relevant findings and presents some useful recommendations to help the prescriber. It highlights the most significant parameters that influence this behavior, in order to adjust the predicted value and the real value to maximum.

Finally **chapter VIII** shows the general and specific conclusions reached, as well as recommendations for future research. Document ends up with references and a bibliography.

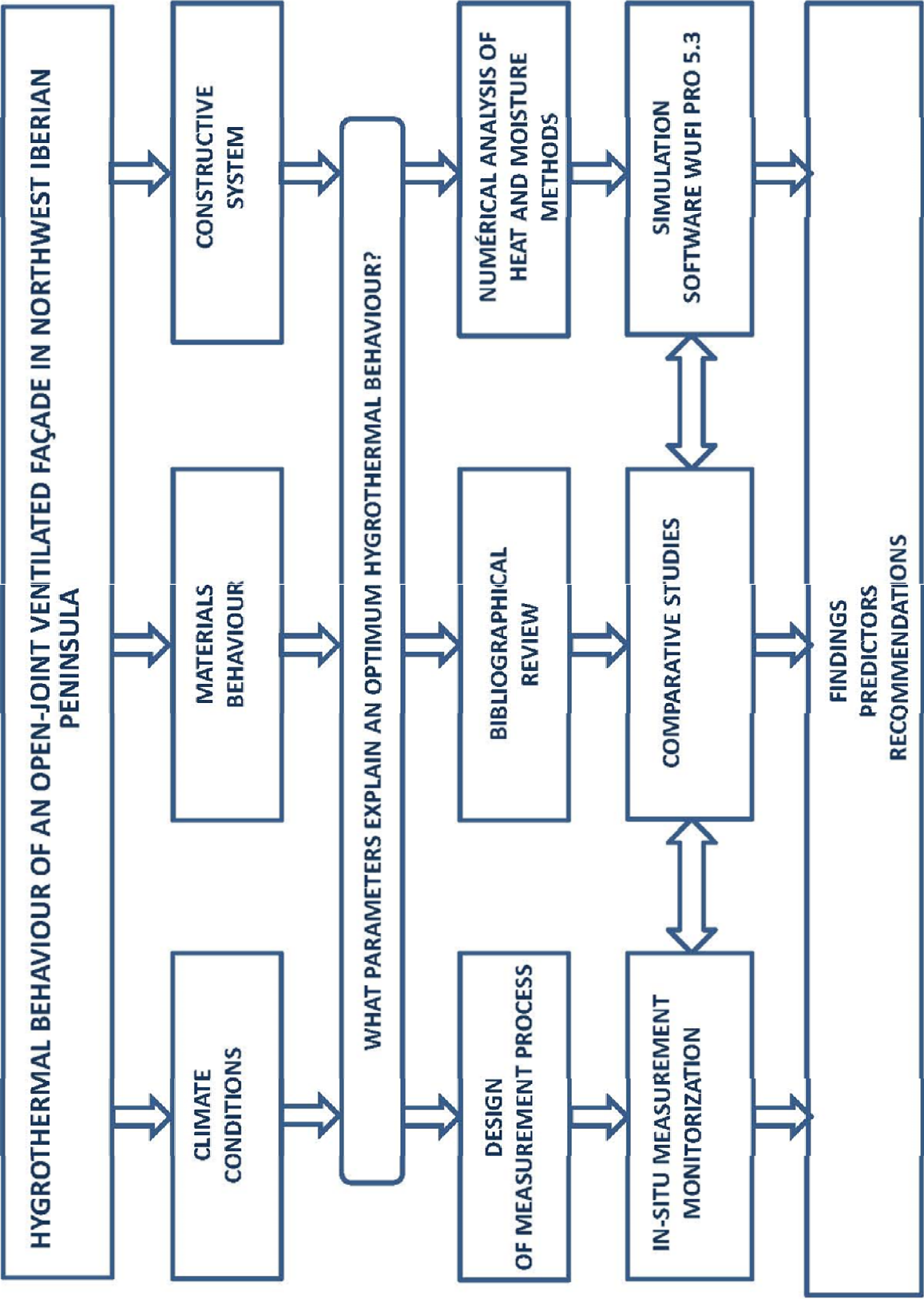


Figure I.3: Conceptual scheme of doctoral thesis

ESTADO DEL ARTE

A lo largo de la historia en España, la construcción arquitectónica ha evolucionado y sufrido muchos cambios. Uno de los más importantes es la aparición de nuevos estándares en el ámbito de la construcción: el Código Técnico de la Edificación (2006). Actualmente esta legislación contribuye a guiar los procesos para el diseño constructivo. Es el resultado de políticas europeas y de la recopilación de las investigaciones llevadas a cabo hasta la fecha. El avance de la disciplina constructiva, basada históricamente en la experiencia local y artesanal y en el ensayo-error, se ha transformado en una investigación industrial, especializada e internacional. Investigación que va incorporándose progresivamente a estos estándares.

Es bien sabido que la envolvente juega un papel determinante en la edificación. En ella tienen lugar algunos de los mayores intercambios de calor entre el edificio y el ambiente. A nivel higrotérmico y energético en un edificio se puede decir que el diseño de la envolvente es esencial. Y el caso del sistema de fachada ventilada no es una excepción.

Los niveles prestacionales en la construcción de edificios vienen definidos en el Reglamento de Productos de Construcción Nº 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo y son: resistencia mecánica y estabilidad, seguridad en caso de incendio, higiene, salud y medioambiente, seguridad y accesibilidad de utilización, protección frente al ruido, ahorro de la energía y aislamiento térmico y finalmente la utilización sostenible de los recursos naturales. Para un correcto diseño constructivo, el trabajar con estas prestaciones, permitirá obtener una calidad final de la edificación y un gran confort de sus ocupantes.

Los edificios son el tema central en la política europea de 2014-2020. De hecho, en la *estrategia Europa 2020* (COM, 2010) se expone que, en el crecimiento de la UE en la próxima década, habrá que desarrollar una mayor dimensión ambiental y de sostenibilidad. Entre los objetivos está el reducir las emisiones de efecto invernadero (en adelante denominados GEI) indicado ya en la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de Copenhague (2009). Los edificios representan actualmente una media del 40% del consumo de energía en Europa. La Directiva 2012/27/UE sobre *eficiencia energética* ha establecido un

marco común de medidas para la promoción de la eficiencia energética a fin de garantizar una reducción de energía de un 20% para el año 2020.

En el caso concreto de la legislación de edificación, la Directiva europea 2010/31/UE relativa a la *eficiencia energética de los edificios* (en lo sucesivo denominada Directiva EPBD) en su artículo 9 se exige a los Estados miembros a garantizar que antes del 31 de diciembre de 2020, que todos los nuevos edificios sean edificios de energía casi nula; y el 31 de diciembre 2018, los nuevos edificios ocupados y de propiedad de las autoridades públicas sean edificios de consumo casi nulo.

En el año 2013 se modificaron algunos documentos del C.T.E. de España, y en línea con el desarrollo de esta Directiva, se elevaron niveles prestacionales. A pesar de ello, en octubre del 2014, según un informe del ECOFYS, en España aún no se había definido el significado real de un edificio de consumo casi nulo (en siglas NZEB). En 2018 se tiene previsto una tercera revisión del C.T.E. y que exista una definición final que se adoptará en 2019. Los Estados miembros deben asegurar que todos los nuevos edificios sean de consumo de energía casi nulo en 2020.

Si en el año 2013 se han incrementado los valores prestacionales en higiene y ahorro de energía (aislamiento térmico), la pregunta planteada ahora sería cómo se están comportando higrotérmicamente los edificios existentes. Las prestaciones exigidas hace 20 años no se corresponden con las actuales. Es momento de saber a ciencia cierta si un edificio construido se está comportando tal y como predicen los cálculos, sobre todo, en los parámetros higrotérmicos y vinculados al consumo de energía en la envolvente.

La respuesta efectiva a la humedad también es de vital importancia para garantizar un adecuado comportamiento térmico y energético de la envolvente. Por ejemplo, en el caso del clima de A Coruña, éste posee bastantes cargas hídricas como la precipitación, la condensación y la alta humedad relativa. Es importante conocer si la legislación actual está teniendo en consideración adecuadamente este tipo de clima para conseguir un comportamiento higrotérmico de la envolvente real. Es de gran relevancia, ya que en el año 2018 seguirán incrementándose estos niveles. La pregunta también surge si estos nuevos niveles podrán llegarse a cumplir.

En definitiva, este capítulo II trata de exponer la problemática a través de los estudios realizados por la comunidad científica internacional. El **objetivo**, por tanto, es **determinar el conocimiento existente y aplicar la normativa internacional en la prescripción y uso de la fachada ventilada de granito**. Este capítulo está estructurado en tres partes con sus objetivos particulares de cada apartado que se indican a continuación.

La primera parte del capítulo tiene el objetivo de recopilar bibliográficamente variables predictoras que se han advertido condicionantes del comportamiento higrotérmico. Se exponen ordenadas en tres sub-apartados: climáticas o ambientales, materiales y arquitectónicos y constructivos. A continuación, en el segundo apartado, se analiza crítica y comparativamente las exigencias prestacionales de cálculo y diseño indicadas en la normativa a nivel nacional e internacional y en el ámbito térmico e hídrico de la envolvente de la edificación, en particular para las fachadas ventiladas. Finalmente se describe el estado de la

cuestión de los estudios realizados del comportamiento higrotérmico y energético de los cerramientos, buscando en ellos las dificultades y problemas acerca del desempeño real y el calculado.

II.1 VARIABLES DEL CONOCIMIENTO

Existen diversos parámetros o variables que influyen en el comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada. Muchas fuentes bibliográficas, revistas, investigaciones, etc. hacen mención a ellos pero no se ha encontrado un análisis crítico en el que se recojan estos parámetros y se tenga consenso sobre ellos.

El objetivo de este primer apartado del capítulo, por tanto, trata de recopilar bibliográficamente los posibles parámetros predictores del comportamiento higrotérmico para el comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada. Se han clasificado atendiendo al origen de los mismos como climáticos o ambientales, materiales y arquitectónicos y constructivos y se expondrán en este orden:

Parámetros climáticos o ambientales, como su nombre indica son todos los relacionados con el medio ambiente, clima y la localización de un lugar (topografía, orografía, geología,...)

Parámetros materiales. Se incluyen todas las propiedades y comportamiento de los materiales tanto de origen morfológico (estructura y tamaño de poros o la densidad) como de caracterización física (comportamiento hídrico, térmico o acústico).

Parámetros arquitectónicos y constructivos. Finalmente se organiza en este grupo todas las variables que puedan ser consideradas de origen arquitectónico o constructivo, como por ejemplo, las posiciones de los elementos constructivos materiales, la forma de ensamblado, la hermeticidad y singularidad del sistema de fachada, etc.

II.1.1 CLIMÁTICAS O AMBIENTALES

Cuando se habla de clima se refiere a una descripción estadística en términos cuantitativos de la media y variabilidad de una serie de magnitudes como la temperatura, la humedad relativa, precipitaciones, etc y durante un tiempo suficientemente largo.

La localización, la latitud y la altitud, la topografía, la cercanía al mar, los fenómenos urbanos, el agua o la vegetación de un lugar influyen en el clima del lugar.

A lo largo de la historia se ha intentado hacer clasificaciones del clima para poder realizar comparabilidad entre lugares, incluso muy lejanos y tomar medidas en muchos ámbitos como la agricultura.

La clasificación Köppen Geiger

De todas **las clasificaciones climáticas** es la clasificación de Köppen Geiger una de las más ampliamente utilizadas. Esta clasificación se definió hace unos cien años. La clasificación se realiza atendiendo a una relación entre la temperatura y las precipitaciones. Para su designación se utilizan letras mayúsculas, y minúsculas.

Esta clasificación es de suma importancia ya que la clasificación climática se ha realizado a nivel mundial, y por lo tanto, es posible establecer comparaciones climáticas con otros lugares dispares. En la figura siguiente, se observa todos los continentes donde esta clasificación climática existe y que están indicados con color verde intermedio. Si la comparamos con otras, esta clasificación Csb es pequeña en todo el mundo.

Se puede observar en la siguiente figura las localizaciones en el mundo que poseen este tipo de clima Csb que junto a Csa son pocas. Los lugares que exponen el mapa siguiente son localizaciones con altas precipitaciones. Puede observarse que existen ciertas zonas en la costa este canadiense, Chile, partes del sureste y suroeste de Australia, Costa atlántica de Sudáfrica, costa oeste de Grecia y el Noroeste Peninsular Ibérico.

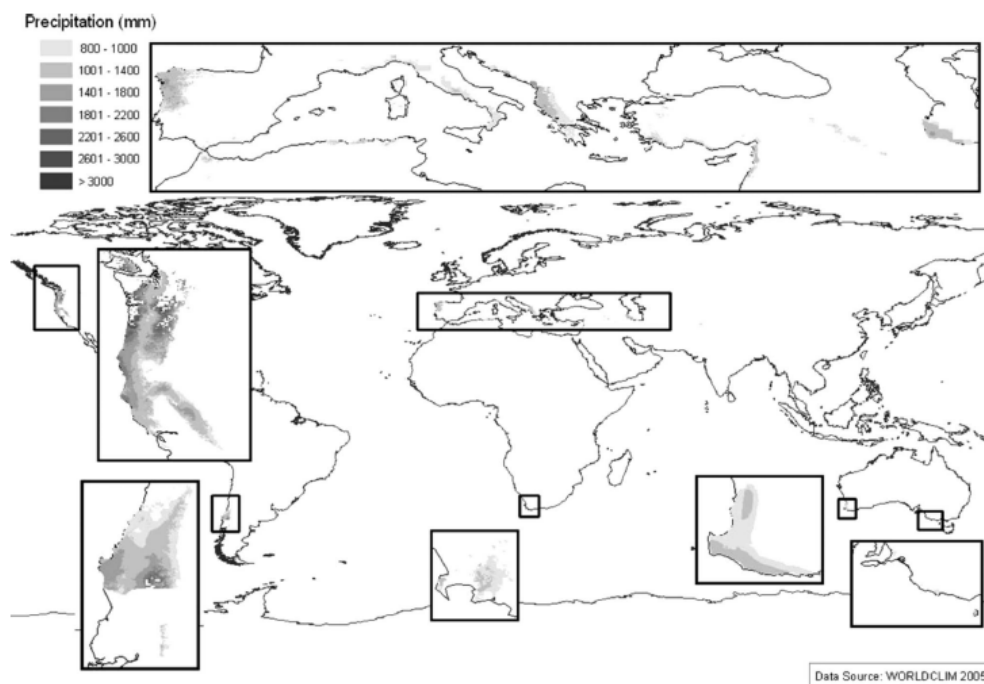


Figura II.2: Localización de los climas Csa y Csb con altas precipitaciones. (Sander y Wardell-Johnson, 2012)

El clima en España y Galicia

Si se analiza la clasificación climática de España, se observa la variabilidad del clima según la localización. En particular Galicia es clasificada Köppen-Geiger como Csb y Cfb, el mismo clima dominante principalmente en Francia o Gran Bretaña.

Sin embargo, según diferentes fuentes, la clasificación Csb completa para el clima de Galicia no es del todo cierta, ya que los investigadores han clasificado también como Cfb definido como clima atlántico con verano suave. Por tanto, no están claros los límites de clasificación climática Köppen Geiger en Galicia.

La clasificación climática en el Código Técnico de la Edificación C.T.E.

Anteriormente al Código Técnico de la Edificación C.T.E., la Norma Básica de la Edificación N.B.E. hacía una clasificación climática en cinco zonas climáticas (A, B, C, D, E) a través de los rangos de grados-día durante el periodo de calefacción.

En la actualidad esta clasificación climática define 12 zonas peninsulares corresponden a la combinación de una severidad climática de invierno identificadas con las letras (A, B, C, D o E) junto con una severidad climática de verano, identificadas con los números (1, 2, 3, o 4) dando lugar a los siguientes tipos de zonas climáticas: A3, A4, B3, B4, C1, C2, C3, C4, D1, D2, D3 y E1.

La severidad climática es una variable obtenida mediante formulación indicada en el Código que depende de los parámetros normativos de temperatura seca, humedad relativa y de la irradiancia solar global. Se trata de agrupar las localizaciones que tengan el mismo valor de severidad climática, puesto que tendrían la misma demanda energética.

La figura II.3 muestra gráficamente la clasificación climática del C.T.E. en España. De todas formas, esto no es de todo cierto, ya que por altura dentro de la misma región, la clasificación climática va variando.

La principal diferencia de la clasificación de Köppen Geiger con respecto a la clasificación que toma la norma, es que considera como parámetros para la clasificación las temperaturas y precipitaciones.

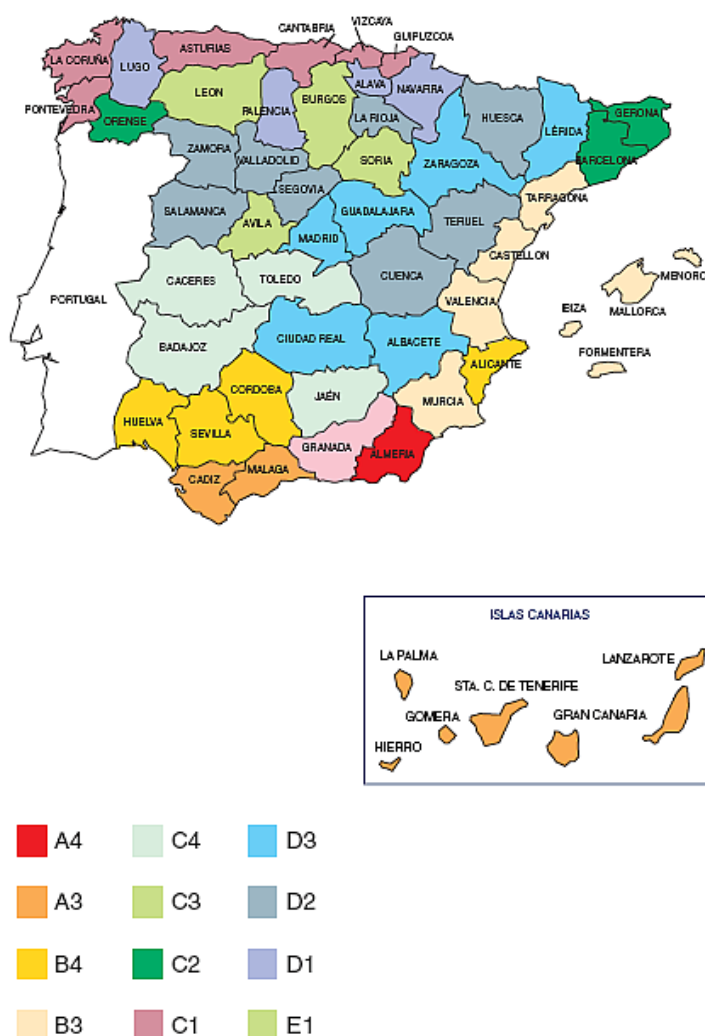


Figura II.3: Clasificación climática según el Código Técnico de la Edificación C.T.E.

La clasificación del C.T.E. es sobre temperatura, humedad relativa y la irradiancia. No se tiene en consideración las precipitaciones. Esta clasificación es muy adecuada para las áreas de España donde la irradiancia es muy elevada, ya que llega a ser similar que en el Norte de África. Sin embargo, la zona Noroeste de la Península Ibérica le corresponde una irradiancia global media, la mitad de la existente en el Sur peninsular.

Galicia y las precipitaciones

Pero veamos que sucede de forma objetiva si se analizan los datos climáticos para la localización de Galicia. En el caso de las **precipitaciones**, Galicia y la zona Norte de Portugal, así como la cordillera cantábrica poseen las mayores cantidades de precipitaciones anuales. Contrastan las zonas más áridas de la península ibérica como Almería, con sólo 200mm de agua anuales. En contraste, el clima gallego también tiene muchas localizaciones con gran cantidad de precipitaciones, tal y cómo se refleja en la figura II.5 con color violeta, indicando con los colores violáceos, los valores máximos de precipitación 2200mm (ver leyenda).

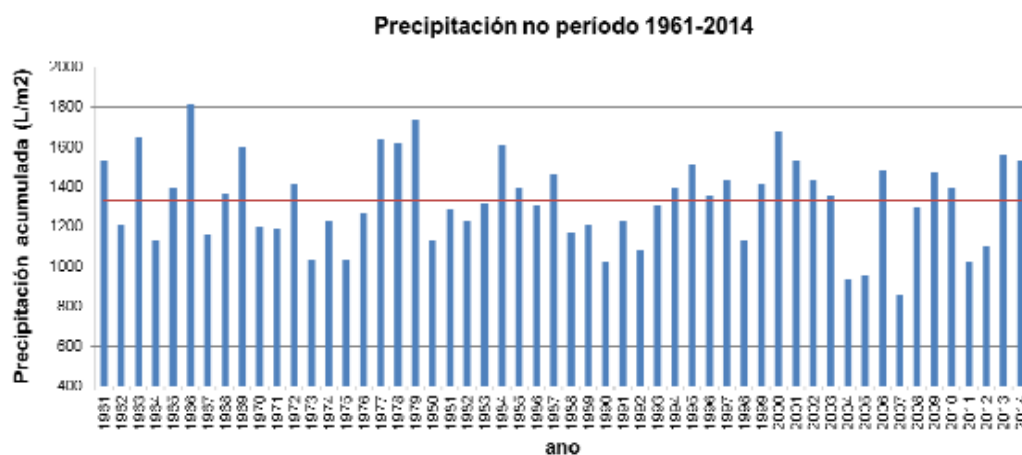


Figura II.4: Evolución de la precipitación anual 1961-2014 (Fuente: Informe climático anual de Galicia 2014)

En el año 2014, en Galicia, se registraron precipitaciones anuales de 1531 l/m², muy próximos a los 1558 l/m² del año 2013, los dos resultaron años húmedos.

La cantidad de precipitación es un parámetro climático que nos indica el posible riesgo de ingreso de agua en el cerramiento. Es condición indispensable conocer la climatología del lugar y recoger detalladamente los datos climáticos del mismo. Además en estudios de investigadores como (Künzel, 1995) indican que aproximadamente el 70% de la lluvia incidente que bate sobre la fachada permanece allí, el resto se expande en la superficie y cae al suelo.

La figura II.5 de la izquierda representa la precipitación acumulada en el año 2014. Es importante reseñar la variabilidad de valores, obteniéndose unos máximos de 2400 mm y unos mínimos de alrededor de 600mm. La localización de A Coruña se sitúa entre 1200 y 1600mm.

Se ve relevante, por tanto en estos casos, tomar en consideración las precipitaciones. En la actualidad existe un parámetro derivado de la cantidad de agua de lluvia denominado **lluvia batiente o incidente**, en inglés Wind Driven Rain (**WDR**) que usa el valor de la precipitación recogida, junto a otros parámetros como la dirección del viento para determinar la cantidad de agua de lluvia que puede incidir sobre la superficie vertical. Este parámetro ambiental se revela esencial dada la gran cantidad de precipitaciones puesto que nos dará información del nivel de exposición al agua de un edificio y en concreto de una fachada.

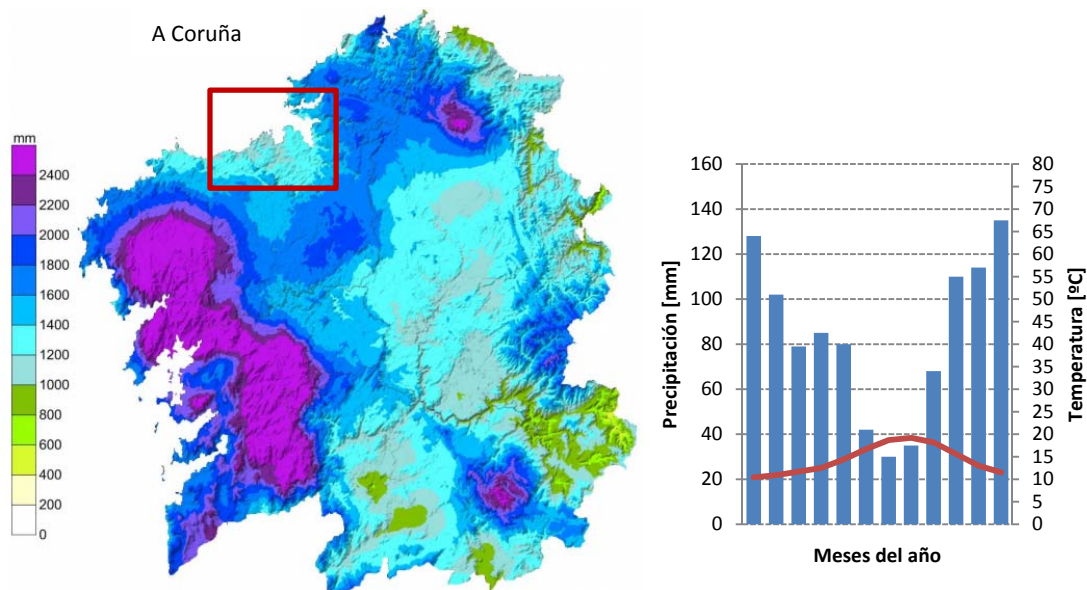


Figura II.5: Mapa de precipitación acumulada en el año 2014 (Informe climático anual de Galicia 2014) y diagrama ombrotérmico de A Coruña con datos con valores climáticos normales de temperatura °C en línea roja y precipitación mm en barras azules (1971-2000) de la estación de A Coruña AEMET

Clima de A Coruña

La base de datos on-line consultada [<http://data.org>] describe el clima de A Coruña. Lo define como cálido y templado. En invierno hay mucha más precipitación que en verano. La locación de A Coruña es clasificada por Köppen-Geiger como Csb. La temperatura media anual se encuentra a 14.2 °C. Las precipitaciones anuales rondan los 1000mm. El mes más seco es julio, con una precipitación mensual de 30mm. El mes que ha tenido los mayores valores del año ha sido diciembre con aproximadamente 133mm de precipitación caída.

En el diagrama ombrotérmico representado en la parte derecha de la figura II.5, se observa como en todos los meses se producen lluvias, correspondiendo la menor cantidad de precipitaciones con los valores más altos de temperatura ambiental. Por el contrario la tendencia es opuesta en el caso del invierno donde la temperatura es baja y las precipitaciones más elevadas.

En el caso de los vientos, la rosa de los vientos representada muestra las direcciones principales, así como las velocidades del mismo. El color rojo indica las mayores velocidades representadas en su orientación dominante.

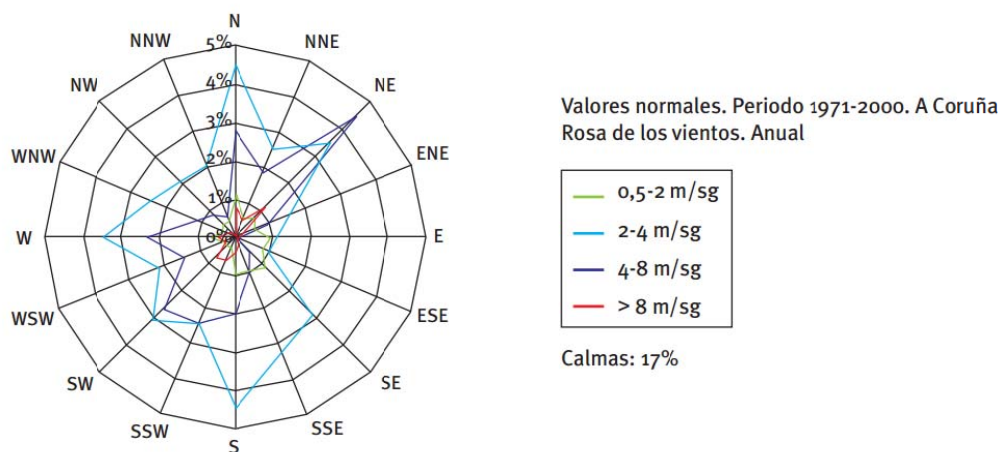


Figura II.6: Rosa de los vientos de A Coruña del periodo 1971-2000. (Fuente IDAE)

Martí Ezpeleta, (1998) indica que en el observatorio de AEMET de A Coruña ciudad se ha encontrado que no existe una polarización del viento clara, si bien destaca ligeramente la componente N. En el **régimen medio** existe un cierto predominio de las componentes del primer cuadrante –N, NNE y NE fundamentalmente–, consecuencia de la persistencia de los flujos de viento generados por la instalación casi permanente del Anticiclón de las Azores al noroeste de la Península Ibérica durante el período estival. En general, se trata de vientos de media y baja intensidad que afectan en mayor medida a las comarcas más septentrionales. En el régimen de rachas máximas, sin embargo, se hace patente un incremento de la frecuencia de los vientos de poniente –en especial los del tercer cuadrante– que alcanzan altas intensidades.

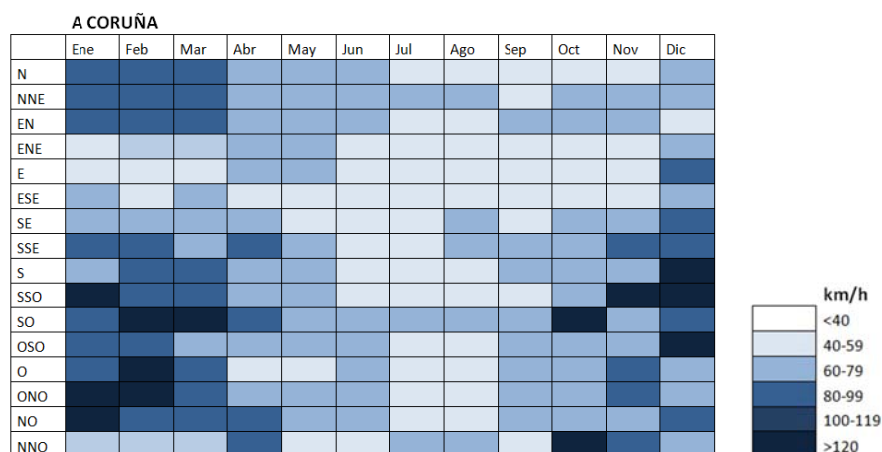


Tabla II.1: Estacionalidad de las rachas extremas de viento (velocidad y dirección) según los meses del año en la estación de Aemet de A Coruña ciudad. Adaptado de Martí Ezpeleta (1998)

En la tabla II.1 se muestra, se puede correlacionar las rachas de viento con la orientación de la misma en cada mes y a lo largo del año. Se puede deducir que es en el invierno cuando se producen las rachas de viento con mayor velocidad. Esto se correlaciona también con las mayores precipitaciones, tal y como se reflejó anteriormente.

Con respecto a la irradiancia solar global en A Coruña se puede observar en la figura II.7 atendiendo a los colores como es en relación de Europa y España. La irradiancia de esta localización es más típica de los países centroeuropeos que del resto de España.

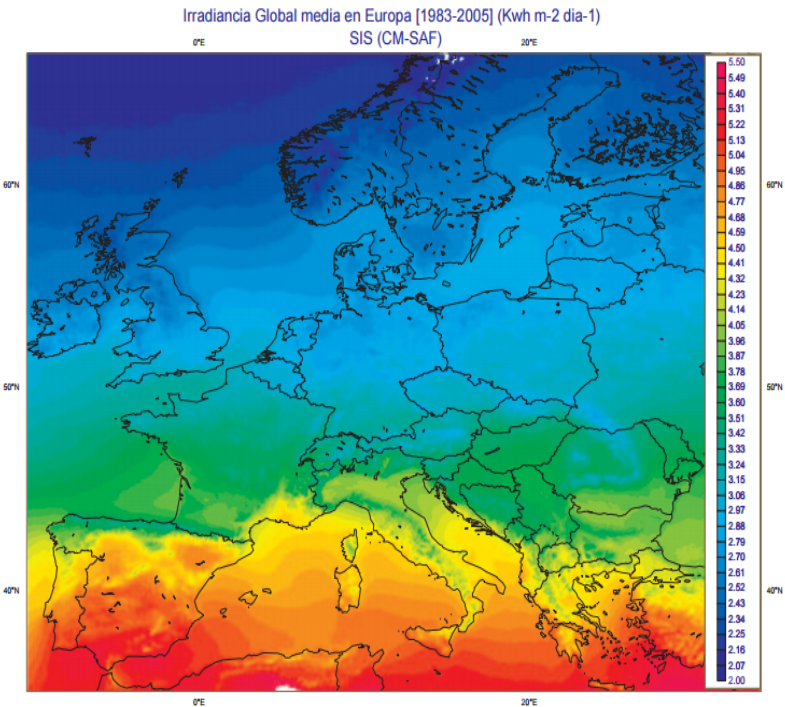


Figura II.7: Irradiancia global media en Europa 1983-2005 (Fuente: Eumetsat)

Clasificación climática para el interior de los edificios

Se ha hablado del ambiente y clima exterior pero bien es cierto que existe un ambiente interior. Para definir climas interiores, existen también diferentes métodos que los clasifican y son descritos en los estándares normativos que se relacionan.

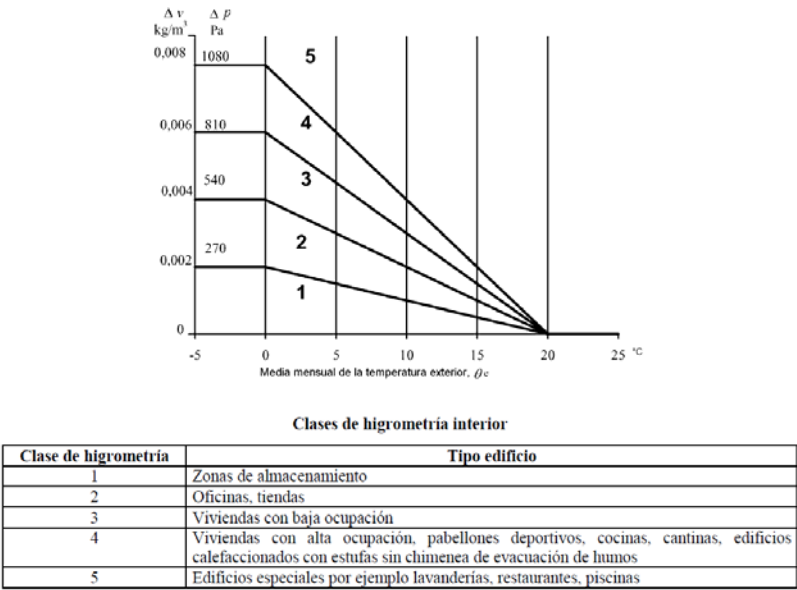


Figura II.8: Clases de higrometría interior y variación de la humedad interior en función de las clases de higrometría y la temperatura exterior. (UNE EN ISO 13788:2002)

El estándar **UNE EN ISO 13788:2002** contiene un método para categorizar edificios en clases climáticas atendiendo a su probabilidad de exceso de presión de vapor. En el anexo informativo A de la EN ISO 13788:2002 se indica que se pueden establecer cinco clases de higrometría interior. La figura A.1 muestra los límites de Δv y Δp para cada clase.

Este método se aplica bien en edificios en climas marítimos e inviernos moderados y húmedos, como Gran Bretaña y el Noroeste de Europa.

El estándar **EN ISO 15026:2007** contiene un esquema alternativo que es más apropiado para climas continentales.

En la figura II.9 da una temperatura interior y una humedad relativa en función de la temperatura exterior. Hay dos clases de humedad relativa interna: A ocupación normal y B alta ocupación.

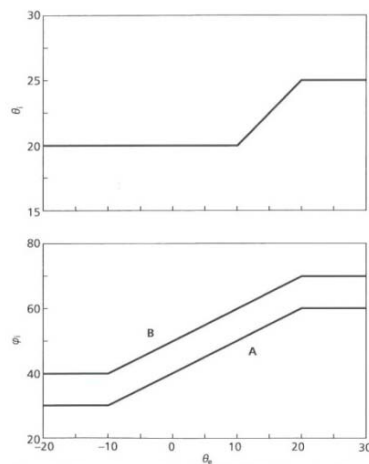


Figura II.9: Clases climáticas definidas. (EN ISO 15026)

La Asociación Científica y técnica para el mantenimiento de los edificios y la preservación de los monumentos. (WTA) **Guía-WTA 6-2-01/E** “*Simulation of Heat and Moisture Transfer*” expone simulaciones higrotérmicas como una alternativa al método de Glasser.

El contenido de esta guía habla del potencial y las limitaciones de los métodos actuales de simulación, los fundamentos físicos, las propiedades de los materiales, las condiciones iniciales y límites, las soluciones numéricas y la documentación de resultados.

ASHRAE Standard 160P: “*Design criteria for moisture control in buildings*” en el apartado de criterios para los parámetros de diseño:

24-hour running average of outdoor temperature	Indoor Design Temperature, °C (°F)	
	Heating only	Heating and air-conditioning
$T_{o,24h} \leq 18.3^{\circ}\text{C}$ ($T_{o,24h} \leq 65^{\circ}\text{F}$)	21.1°C (70°F)	21.1 °C (70°F)
$18.3^{\circ}\text{C} < T_{o,24h} \leq 21.1^{\circ}\text{C}$ ($65^{\circ}\text{F} < T_{o,24h} \leq 70^{\circ}\text{F}$)	$T_{o,24h} + 2.8^{\circ}\text{C}$ ($T_{o,24h} + 5^{\circ}\text{F}$)	$T_{o,24h} + 2.8^{\circ}\text{C}$ ($T_{o,24h} + 5^{\circ}\text{F}$)
$T_{o,24h} > 21.1^{\circ}\text{C}$ (70°F) ($T_{o,24h} > 70^{\circ}\text{F}$)	$T_{o,24h} + 2.8^{\circ}\text{C}$ ($T_{o,24h} + 5^{\circ}\text{F}$)	23.9°C (75°F)

Note: $T_{o,24h}$ = 24-hour average outdoor temperature

Tabla II.2: Temperatura de diseño interior. (ASHRAE 160P)

La humedad relativa interior se podrá determinar atendiendo a uno de los tres métodos expuestos por la ASHRAE 160P: método simplificado, método intermedio y método con todos los parámetros.

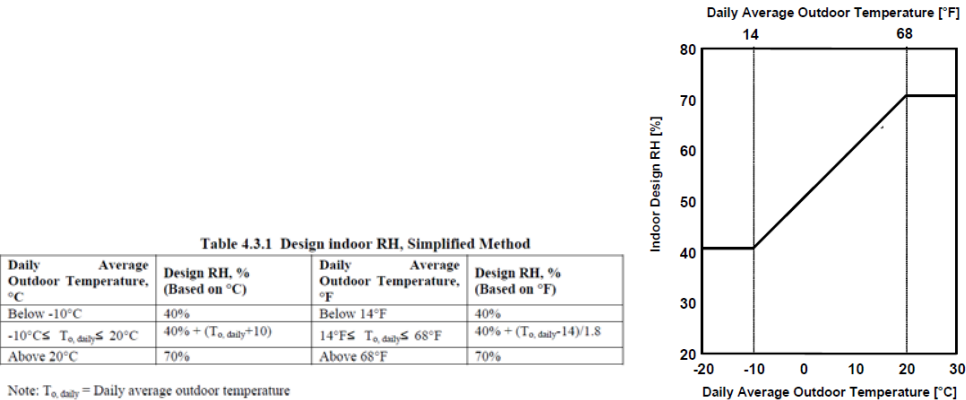


Figura II.10: Humedad relativa interior de diseño atendiendo a la media de temperatura exterior según el método simplificado. (ASHRAE 160P)

En definitiva, existen varias formas de incorporar el clima interior de la edificación en los cálculos o simulaciones. En resumen son éstos:

UNE EN ISO 13788:2002 – La temperatura interior se fija por el usuario y permanece constante a lo largo del año. La clase de humedad puede también puede ser variada.

EN 15026:2007 – La temperatura interior a lo largo de la estación de calefacción se fija en 20ºC y la carga de humedad puede ser definida como normal o alta.

ASHRAE 160P – La temperatura interior del invierno y la variación puede ser definida por el usuario. La carga de humedad puede ser estimada definiendo el número de ocupantes, el volumen del edificio y el número de renovaciones de aire por hora a presión normal.

Curvas sinoidales – Es una opción simplificada que usa unas curvas predeterminadas o que el usuario puede definir la temperatura interior y la humedad relativa.

Datos propios del usuario – Los datos medidos en el interior pueden también ser utilizados para crear un archivo de datos climáticos propios.

Para finalizar y en conclusión, se ha detectado que las precipitaciones en el clima en Galicia y en concreto en A Coruña son relevantes. Sin embargo, la clasificación climática utilizada en el C.T.E. DB-HE no tiene en consideración como parámetro normativo la precipitación y si la irradiancia solar global. En el caso del clima interior, existen varios procedimientos para caracterizarlo. La adecuada elección será determinante para poder comprender lo que pueda suceder en el cerramiento desde el punto de vista higrotérmico.

II.1.2 CARACTERIZACIÓN HIGROTÉRMICA DE LOS MATERIALES Y DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Siguiendo con el objetivo planteado, en este apartado se exponen y recopilan las variables predictoras que tienen influencia en las propiedades de los materiales para el comportamiento higrotérmico de los cerramientos. Se ha organizado en dos partes. La primera toma en consideración los fenómenos y propiedades de los materiales desde el punto de vista hídrico. En la segunda parte se hace una referencia a los fenómenos y propiedades térmicas. Finalmente se resumen las propiedades que se han observado más relevantes en cada ámbito, hídrico y térmico.

La química del agua

La humedad es un parámetro que influye enormemente en los materiales de construcción. Además, el agua, como cualquier otra molécula lleva asociada una energía. En este caso, ésta posee una energía vinculada al calor sensible, pero también al calor latente.

Cuando una sustancia cambia de estado a otro, la temperatura permanece constante y cede/absorbe calor para cambiar la energía cinética de las moléculas que están pasando de un estado a otro.

Los átomos de hidrógeno de la molécula de agua son atraídos por sus átomos de oxígeno de las moléculas vecinas que forman su estructura cristalina visible del agua líquida. Para evaporar el agua se necesita energía para romper los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua. Esta energía puede ser captada del ambiente, de la energía de radiación, del calor del aire, suelo, pared, etc.

Cuando el agua se condensa se forma enlaces de hidrógeno y el calor latente se libera como calor sensible que causa un aumento de la temperatura. El contenido de calor latente aumenta con la humedad absoluta, es decir, con la cantidad de agua en un volumen. Puede verse en la figura II.11 la geometría de la molécula de agua.

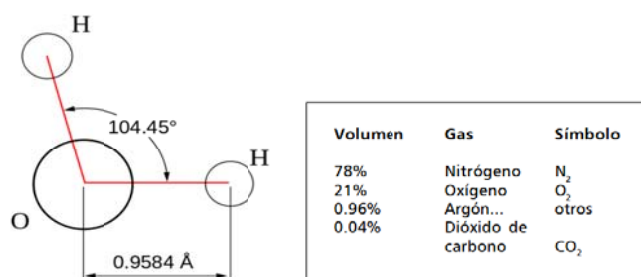


Figura II.11: Geometría de la molécula de agua y composición

Los puentes de hidrógeno se rompen en un proceso continuo. Una molécula de agua puede unirse a 4 moléculas de agua por puentes de hidrógeno actuando dos de ellos como donadores y dos de ellos como receptores.

Los calores latentes son valores altos por la rotura de enlaces de hidrógeno y son en el caso en el calor latente de condensación=80 cal/g o 334.400 J/Kg y en el caso del calor latente de vaporización=540 cal/g o 2.257.200 J/Kg.

Por tanto, por el hecho de poseer agua en los materiales de construcción, existirá una energía vinculada no sólo a su temperatura sino también a sus cambios de estado, calor latente.

La humedad en los materiales

Se considera que existen tres mecanismos básicos para la permanencia de humedad en ellos, **higroscopicidad, condensación y capilaridad** y son los que permiten entender en la mayoría de los casos, la variación del contenido de humedad en el interior de los materiales con estructura porosa. (Freitas, 2008)

Higroscopicidad. Es una propiedad de los materiales que consiste en la tendencia de capturar las moléculas de agua en las superficies sólidas. El fenómeno se denomina adsorción y es atribuido a las fuerzas intermoleculares de Van del Waals, que actúan en la interface de sólido-líquido, en el interior de los poros. En definitiva, cada material tiene su capacidad para adsorber agua y dependerá de la temperatura, presión parcial de vapor y la superficie.

Las características de la superficie distinguen a los materiales en **higroscópicos**, cuando la cantidad de humedad fijada en su interior es relativamente importante, y **no higroscópicos**, cuando su masa es prácticamente constante en cualquier contenido de agua en el aire.

Capilaridad. Es un fenómeno que sucede cuando el material se pone en contacto con el agua líquida, absorbe agua hasta alcanzar la saturación de agua (w_f o w_{max}). Hay un intercambio hasta que se alcanza el equilibrio.

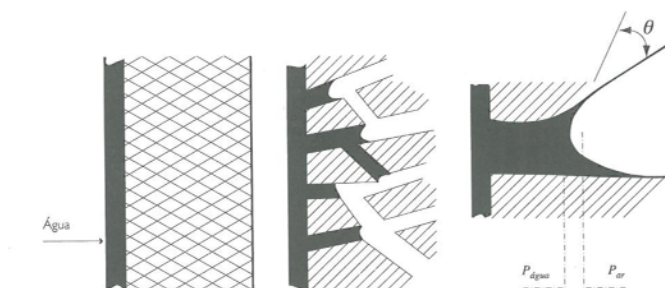


Figura II.12: El fenómeno de capilaridad. (Freitas, 2008)

En los materiales, concretamente en el interfaz líquido-gas se establece un gradiente de presiones designado por **presión capilar** que es función de la tensión interfaz σ , de los radios de curvatura principal R y del ángulo de humidificación θ_h . (Freitas, 2008)

$$P_c = P_{aire} - P_{agua} = \gamma \left(\frac{1}{R_{d1}} - \frac{1}{R_{d2}} \right) \cos \theta_h \quad \text{Unidades: [N/m}^2\text{]}$$

Siendo:

P_c	[Pa]	Presión capilar
P_{aire}	[Pa]	Presión de aire
P_{agua}	[Pa]	Presión de agua
γ	[N/m]	Tensión superficial

θ_h	[°]	Angulo de humidificación
R_{d1} y R_{d2}	[°]	Radios de curvatura

La presión capilar es función de la temperatura y del contenido de humedad, dado que σ varía con la temperatura y R con el contenido de humedad. El desarrollo de la curva de presión capilar (succión) depende de la ley de distribución, del radio de poros y de su variación. La succión es tanto menor cuanto mayor sea el contenido de humedad y se anula para un contenido de humedad igual al contenido de humedad máximo. (Freitas, 2008)

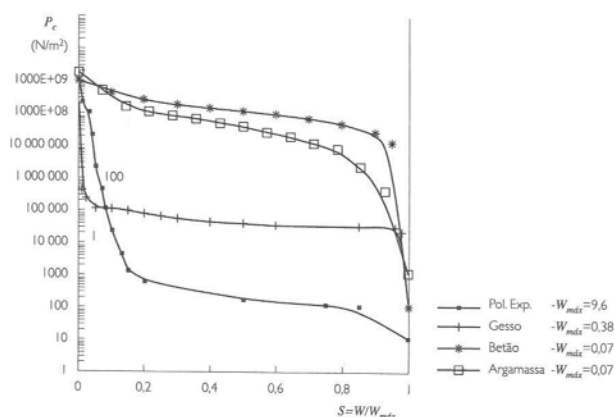


Figura II.13: Curva de presión capilar de diferentes materiales de construcción. (De Freitas, 2008)

El mecanismo de **absorción de agua por capilaridad** depende principalmente del tamaño del poro y de la geometría del sistema de poros. La capilaridad es la principal fuerza para la absorción de agua por los poros de radio entre $1\mu\text{m}$ y 1mm . En general, absorción de agua por capilaridad rápida en materiales porosos con poros grandes y baja absorción con poros pequeños. La absorción de agua por capilaridad de los materiales porosos se determina con el coeficiente de absorción de agua:

$$A = W/\sqrt{t} \quad \text{Unidades: } [\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}]$$

Dónde:

A	$[\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}]$	Coeficiente de absorción de agua
W	$[\text{Kg}/\text{m}^2]$	Masa de agua por superficie
t	[h]	Tiempo de absorción

Condensación. Es un fenómeno en el que el agua en estado vapor dentro del material pasa a agua en estado líquido. En el interior del elemento de construcción, y en cualquier punto, la presión de vapor tiene que ser necesariamente menor o igual a la presión de saturación. Cuando la presión de vapor es igual a la de saturación se produce la condensación.

Existe una teoría de difusión del vapor propuesta por Glaser y que se desarrolla en la norma UNE EN ISO 13788:2002 y la que la mayoría de códigos europeos de edificación la incorporan. Este método supone realizar una gráfica como la que se muestra a continuación representando las curvas de presión de saturación a cada temperatura de los materiales del

sistema constructivo, así como la curva de presión a la temperatura y humedad existente. Donde las curvas representadas se crucen habrá condensaciones.

Cuando los contenidos de humedad generados por la condensación son elevados, pasa a haber flujos de humedad en fase líquida en el sentido contrario al flujo de vapor.

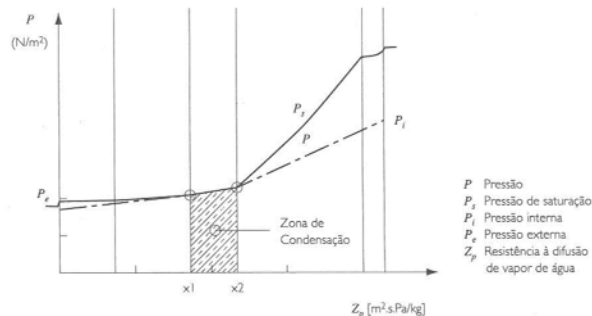


Figura II.14: Cálculo gráfico de la ocurrencia de condensaciones. (Freitas, 2008)

Estos tres mecanismos descritos se encuentran en los materiales sin poder ser disociados. Se puede incluso añadir la gravedad y las presiones exteriores generadas por el viento, que hace mucho más difícil el estudio. (Freitas, 2008)

Lo cierto es que la realidad es más compleja. Otros autores como (Treschel, 1989) han recogido con detalle los mecanismos de almacenamiento, transporte, fases y cambios de fase que pueden producirse en los materiales de construcción. El esquema que abajo se representa da muestra de ello.

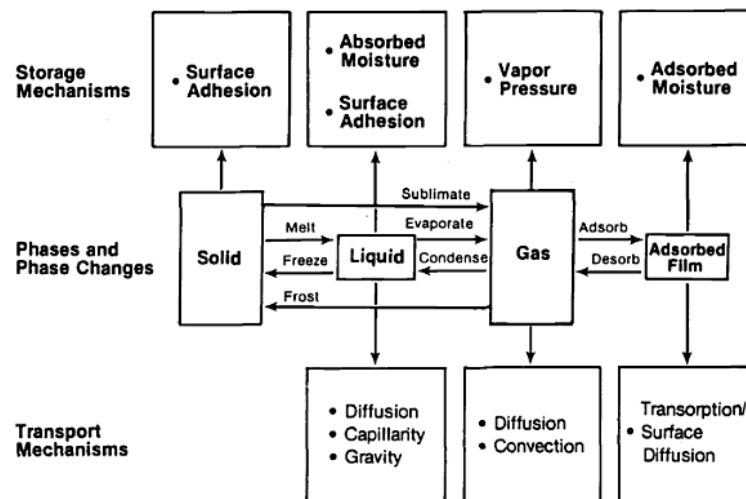


Figura II.15: Vista esquemática de los mecanismos de humedad: almacenamiento, cambios de fase y transporte. (Treschel, 1989)

Sin embargo, ya que las condiciones de humedad del material varían con el ambiente, es requisito también indispensable correlacionar ese contenido de humedad con el ambiente. El parámetro climático que determina la condición de agua en el ambiente es la humedad relativa. Estableciendo esta relación se construyen las **gráficas/isotermas de sorción** de agua de cada material. Las curvas de sorción tienen dos regiones principales, la región higroscópica y la región de capilaridad.

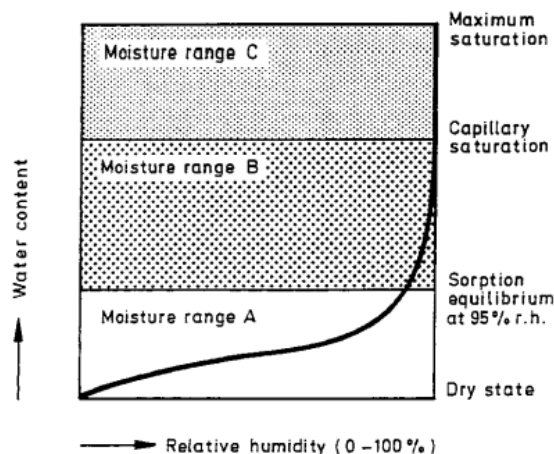


Figura II.16: Isoterma de sorción. Diagrama específico del almacenamiento de agua en función de la higroscopicidad del material. (Künzel, 1995)

Dominio o región higroscópica

Las superficies sólidas en contacto con vapor de agua tienen la tendencia de capturar las moléculas de agua en ellas por **adsorción**. La cantidad máxima de humedad adsorbida para un sólido depende de la temperatura, la presión parcial de vapor de agua y la superficie. En definitiva, cada material tiene su afinidad para adsorber agua. La figura anterior define como **región A y B** hasta que se alcanza el contenido de humedad crítico y hasta que el material poroso se pone en contacto con el agua en fase líquida. La región higroscópica varía el rango de contenido de humedad desde el estado seco hasta el 95% de humedad relativa.

Dominio o región de capilaridad

La región de capilaridad, sigue a la humedad de sorción hasta alcanzar la saturación de agua libre (saturación capilar). En la región súper saturada, no hay más estados de equilibrio y se rellenan todas las cavidades. Está definida en la figura como **región C**, el material se pone en contacto con el agua líquida, absorbe agua hasta alcanzar la saturación de agua (w_f o w_{max}).

Generalmente la curva de absorción del agua es la que se tiene en consideración. Aunque si la diferencia entre la curva de absorción y la de desorción (denominada **histéresis**) es muy grande, se deberá tener en consideración.

Mecanismos en el transporte de humedad en un material poroso al incrementar la humedad relativa

Está claro que los mecanismos teóricos no existen en la realidad, sino que coexisten entre ellos y su interrelación es muy compleja. A pesar de ello, a continuación se describen los mecanismos dominantes organizados según un incremento de contenido de humedad en el poro.

Moisture transport in capillary pores

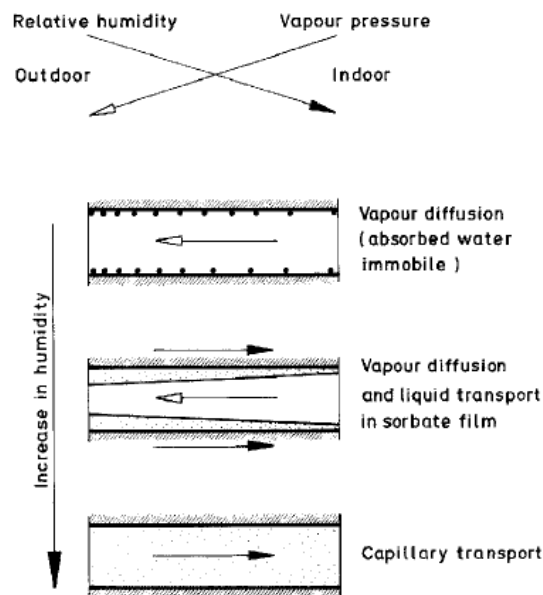


Figura II.17: Gráfica del transporte de humedad en los poros capilares al incrementar la humedad (Künzel, 1995)

Difusión de vapor de agua

Constituye el principal mecanismo de transporte para las moléculas de humedad en estado vapor. Estos mecanismos producen un desplazamiento de las moléculas de agua que es estudiado por la ley de difusión de Fick. El movimiento se produce por el desplazamiento del vapor desde zonas con mayor humedad relativa a zonas de menor humedad relativa. Para que este efecto tenga lugar y se pueda cumplir las condiciones ideales de la ley de difusión de Fick, las dimensiones de los poros, fisuras o heterogeneidades en el material deben permitir el desplazamiento libre de las moléculas.

Para medir y comparar la difusión del vapor de agua en los materiales, se determina un valor matemático denominado μ o **factor de resistencia a la difusión de vapor de agua**, (será referenciado en el siguiente apartado), y que expresa la limitación de la difusión ideal en el material.

El proceso de difusión de vapor de agua se minimiza cuando tienden a equipararse las condiciones de humedad relativa en el interior del material poroso con el ambiente exterior. Se llegaría al estado de equilibrio cuando las condiciones de humedad fuesen las mismas.

Adsorción mono y multicapa

Una vez introducidas las moléculas de vapor por difusión en la estructura porosa, algunas de las moléculas van a quedar adheridas a las paredes de los poros. Si la humedad relativa sigue subiendo, entonces nuevas capas de moléculas de vapor quedarán fijadas sobre la anterior, estableciéndose muchas capas sobre la pared del poro las cuales se podrán desplazar superficialmente (Kunzel 1995), (Krus, 1996). Se produce de este modo una difusión superficial.

A medida que la humedad relativa en el interior del material poroso se incrementa, las capas de las moléculas sobre la superficie del poro aumenta, disminuyendo la sección de para el paso de moléculas de vapor.

Difusión superficial

La difusión en la superficie es definida como el transporte de humedad en las capas de moléculas de agua adsorbidas en la superficie de micro capilares de las paredes de los materiales higroscópicos.

A partir del 60% de humedad relativa, y en el caso de las rocas areniscas, se encuentra este mecanismo. La difusión superficial es un transporte líquido cuya fuerza de movimiento es la humedad relativa.

Condensación capilar

La conducción capilar y la difusión superficial ocurren simultáneamente en el transporte líquido. (Kunzel, 1995)

Al aumentar la humedad relativa y la adsorción multicapa de moléculas de agua, la condensación ocurrirá en poros cada vez más grandes. Junto a la reducción de la sección del poro, se une la presencia de meniscos líquidos en los poros más pequeños. Se produce una obturación de las moléculas de vapor, minimizando su transporte. Se inicia por tanto la saturación por agua líquida.

Si estas condiciones suceden, es necesario que, para caracterizar a un material poroso, tengamos en consideración la humedad relativa, ya que el ensayo se realizará en el estado de saturación del mismo. Así, por lo tanto, el factor de resistencia al vapor de agua μ , no contará con un valor específico sino que será variable.

Se llegará a la condensación capilar cuando la dimensión del poro sea lo suficientemente pequeña y esté conectado con la fuente de humedad exterior (poro abierto). (Pérez Bella, 2012)

Flujo capilar y difusión de vapor

A medida de aumenta la humedad relativa del ambiente, la condensación tendrá lugar en poros cada vez mayores.

La presencia simultánea de agua líquida y de vapor de agua complica el conjunto de mecanismos que tienen lugar a la vez. La humedad se transmite por el mecanismo de difusión de vapor de agua, éste condensaría al encontrarse un poro de pequeño tamaño.

Flujo capilar en material no saturado

Progresivamente y con humedades relativas de aproximadamente 90%, el agua contenida en los poros más pequeños se extiende a los poros cada vez más grandes, colapsando el sistema de poros y generando una fase líquida.

Por debajo de una humedad del 80%, el transporte de humedad en fase líquida en el interior del material, puede considerarse como despreciable, dado que a pesar de producirse condensación capilar, e incrementarse el contenido de humedad del material adecuadamente, los poros no se hallan interconectados entre sí y el agua líquida no es capaz de trasladarse a través del material. (Pérez Bella, 2012)

Interfase sólido-líquido

Es la zona de separación entre dos fases o medios diferentes, líquido el agua y el material sólido. Su contacto provoca que se moje en mayor o menor la superficie del material. El ángulo de contacto entre la superficie del poro y el agua líquida es con frecuencia menor de 90°.

En el interior del material, y en este proceso de incremento de la humedad relativa, la fuerza dominante ahora es la presión capilar (diferencia de presión entre el aire húmedo y el líquido en el sistema poroso). Ésta es superior que la presión exterior.

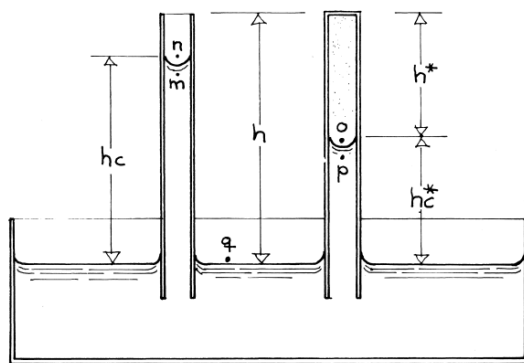


Figura II.18: Comportamientos de capilar libre y capilar ocluido (Fernández Madrid, 1991)

Material saturado

Todo aire contenido en el material poroso acabará por desaparecer alcanzando el contenido de humedad de saturación por capilaridad. Sólo hay fase líquida, desaparecen las interfaces líquido-gas de los sistemas porosos.

Proceso de desorción o secado

En el proceso de secado de un material poroso, se realiza el mismo proceso para la saturación pero de forma inversa a la explicada. En este caso, el agua líquida se elimina inicialmente de los poros más grandes hacia los más pequeños. Las condensaciones desaparecen quedando las moléculas de vapor adheridas a las superficies del poro. Esto llegaría también a desaparecer si el ambiente exterior no tuviese humedad relativa.

En el proceso de secado intervienen todos los mecanismos de capilaridad y difusión antes descritas pero ahora en sentido inverso.

Si analizamos la curva/isoterma de sorción de los materiales se observa como la curva de adsorción no se corresponde con la de desorción. Estas curvas indican que el material poroso, y en los procesos de secado, tiene más contenido de humedad que en el proceso de humedecimiento ya que por una parte el aire ocluido se va eliminando de forma lenta en el

humedecimiento y por otra el aislamiento de los poros grandes y la dificultad para evaporar el agua. La no coincidencia de la curva de contenido de humedad o diferencia entre la adsorción y desorción se denomina histéresis.

A todo ello hay que considerar también el ángulo de contacto entre la superficie del poro y el agua líquida, ya que puede ayudar a magnificar la histéresis.

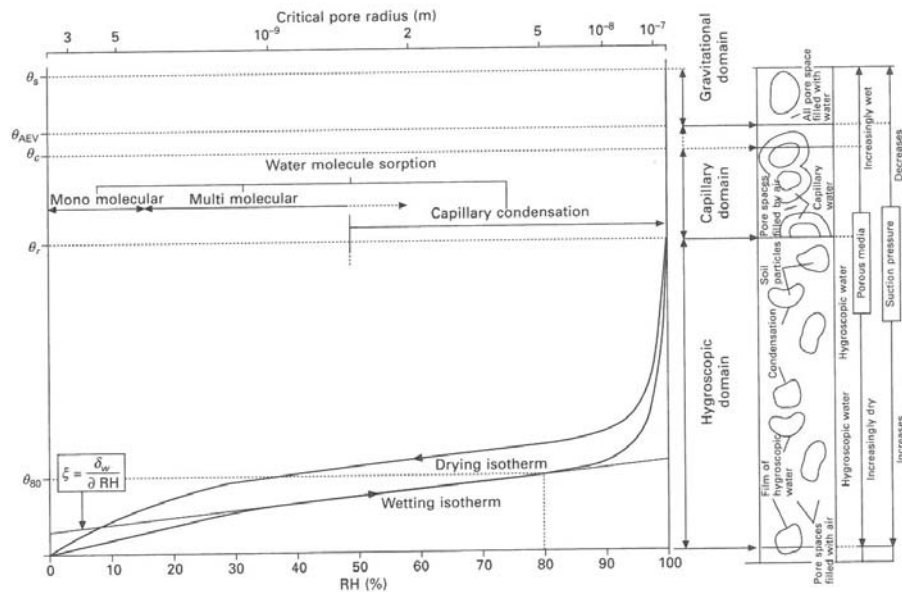


Figura II.19: Típica curva de sorción de mojado y secado (Hall&Allison, 2009)

Propiedades de materiales y ensayos

Para la predicción del comportamiento es necesaria la obtención de datos fiables que sean comparables. Cada material es susceptible de ser ensayado según unos procedimientos y medios regulados en los estándares y normativas en vigor y por lo tanto de ser caracterizado.

Estos datos obtenidos, son cada vez de mayor relevancia pues pueden ser incorporados a procedimientos matemáticos de diversa complejidad desarrollados en un software específico para simular el comportamiento.

Diversos estándares tratan de recoger estas magnitudes como la UNE-EN ISO 9346: 2009. Comportamiento higrotérmico de los edificios y de los materiales de construcción. Magnitudes físicas para la transferencia de masa. Vocabulario. En ella se definen magnitudes físicas y otros términos de transferencia de masa relacionado con los edificios. En ella se incluyen símbolos y unidades correspondientes a esas magnitudes físicas. A continuación se definen los parámetros más representativos de propiedades de materiales requeridos en las simulaciones:

Densidad

Es una propiedad principal de los materiales que relaciona la naturaleza de los materiales que lo constituyen y los huecos que existen en él. Como se considere la medida de la masa y los huecos, distinguimos diferentes definiciones de densidad. Las más comunes son la densidad real y la densidad aparente.

La **densidad real** (según UNE-EN), definida también como densidad de los granos minerales o en inglés *true density* o *matrix density* define la relación entre la masa seca, carente de humedad en relación al volumen de la parte sólida excluyendo los espacios vacíos.

$$\rho_{real} = \frac{m_{seca}}{V_{real}} \quad \text{Unidades: [kg/m}^3\text{]}$$

Dónde:

m_{seca}	[Kg]	Masa seca
V_{real}	[m ³]	Volumen de la parte sólida

Se define **densidad aparente**, en inglés *bulk density*, como la relación entre la masa por unidad de volumen total incluyendo parte sólida y todos los espacios vacíos. Para el cálculo de la densidad aparente se usa, pues, el volumen de poros abiertos.

$$\rho_{aparente} = \frac{m_{seca}}{V} \quad \text{Unidades: [kg/m}^3\text{]}$$

Dónde:

m_{seca}	[Kg]	Masa seca
V	[m ³]	Volumen total

La determinación de la densidad se podría hacer teóricamente, conociendo la proporción de cada componente en el conjunto del material y realizar los cálculos. Experimentalmente se puede obtener a través de ensayo del picnómetro de helio según los procedimientos que se describen en la norma UNE-EN. Otros países (RILEM, ASTM) también recogen el procedimiento de la pesada hidrostática basado en el principio de Arquímedes para la caracterización de la densidad.

De estas dos definiciones se deduce que la densidad real de un material de construcción será superior a la densidad aparente.

Para su determinación experimental, dependiendo del material, se utilizan estándares diferentes, como EN ISO 10545-3:1995 para azulejo; EN 12390-7:2000 para el hormigón o EN-772-13:2000 para muros de mampostería.

Porosidad

La porosidad se define por el porcentaje del volumen de poros en relación al volumen total. Es una propiedad de los materiales de construcción que caracteriza a la densidad aparente y real y tiene efecto directo e indirecto en la mayoría de las propiedades físicas. Un incremento en la porosidad del material, tiene unas consecuencias negativas en el deterioro del material.

$$\xi = (V_v / V_t) \times 100 \quad \text{Unidades: [m}^3\text{] o [%]}$$

Dónde:

V_v	[m ³]	Volumen de poros
-------	-------------------	------------------

V_t [m³] Volumen total

Se establecen fundamentalmente dos tipos de porosidad: la **porosidad abierta** y la **porosidad total**. La última toma en consideración todos los poros incluidos los que no son accesibles. Sin embargo puede haber otras definiciones como porosidad cerrada y porosidad accesible a un determinado fluido. La porosidad accesible al agua se determina con el procedimiento RILEM Test 1.1

La **porosidad total** (n_t) se define como el volumen total de vacíos por unidad de volumen total de material. En este caso deben contabilizarse todos los espacios vacíos presentes: abiertos y cerrados, accesibles y no accesibles.

$$\xi_t = ((\rho_{\text{real}} - \rho_{\text{aparente}}) / \rho_{\text{real}}) \times 1 \quad \text{Unidades: [m}^3\text{] o [\%]}$$

Dónde:

ρ_{real} [Kg/m³] Densidad real

ρ_{aparente} [Kg/m³] Densidad aparente

La **porosidad abierta** (n_a) se conoce también como porosidad accesible o comunicada, y se define de la misma forma como el volumen de poros abiertos (V_a) o comunicados entre sí y con el exterior (accesibles al agua normalmente) por unidad de volumen total de roca (V_t):

$$\xi_a = (V_a / V_t) \times 100 \quad \text{Unidades: [m}^3\text{] o [\%]}$$

Dónde:

V_v [m³] Volumen de poros

V_t [m³] Volumen total

Sin embargo estas características no indican nada acerca del tamaño, número y distribución de los poros del material. Si bien se consideran estas características de gran relevancia. Existen las curvas de porosidad en las que se da información de la porosidad existente en el material en función del tamaño del poro analizado.

La técnica utilizada para la determinación de la porosidad es la porosimetría por intrusión de mercurio. Es muy útil porque permite la determinación de radios de poros para un rango grande. Puede medir la porosidad y la distribución del radio del poro entre 0,0020µm a 200µm.

La distribución de tamaños de poro en el interior de los materiales de construcción es relevante ya que influye sobre los procesos de condensación y regula el proceso de absorción y desorción (histéresis)

El tamaño de poro habitual en los materiales de construcción oscila entre 10⁻¹² y 10⁻⁴ m. Los poros con un radio inferior a 10⁻⁷ m, no pueden ser atravesados por el agua en estado líquido, dado su pequeño tamaño. (Pérez Bella, 2012)

También se puede obtener por pesadas. Las muestras son secadas hasta que se alcance una masa constante (m_1). Después de un periodo de estabilización, las muestras se mantienen inmersas bajo presión constante. El peso de la muestra sumergida (m_2) y la muestra emergida (m_3) se extrae la porosidad abierta n_a

$$\xi_a = (m_3 - m_1) / (m_3 - m_2) \quad \text{Unidades: [m}^3\text{] o [\%]}$$

Dónde:

m_3	[Kg]	Peso de la muestra emergida
m_2	[Kg]	Peso de la muestra sumergida
m_1	[Kg]	Peso inicial de masa constante

Coefficiente de absorción capilar o coeficiente de capilaridad

Se denomina coeficiente de absorción capilar o capilaridad como el cociente entre la masa de agua absorbida por capilaridad por la unidad de superficie y la raíz cuadrada del tiempo necesario para la absorción. Se define como A_w [Kg/m² min^{0,5}]

Para la caracterización de este parámetro, los ensayos y recogida de datos se referencian a periodos largos y cortos. La norma UNE-EN ISO 15148:2003 *Comportamiento higrotérmico de los materiales y productos de la edificación. Determinación del coeficiente de absorción de agua por inmersión parcial*. En este ensayo se determina el valor A_w que describe la absorción de agua en el tiempo de 24 horas, mientras que la probeta esté en contacto con el agua.

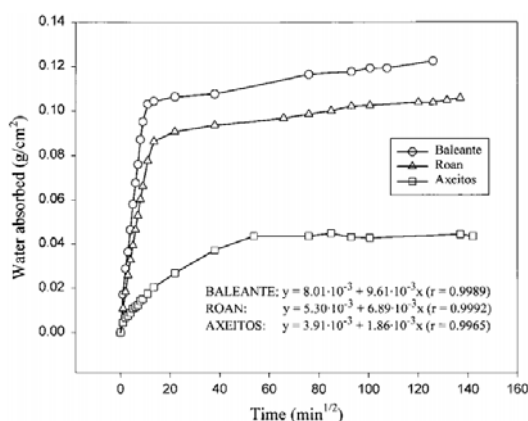


Figura II.20: Perfiles de elevación capilar del agua en los diferentes granitos (Mosquera et al, 2000)

La determinación de la absorción de agua por capilaridad en el exterior, se lleva a cabo a través del ensayo del tubo Karsten

Clase	Valores medios de absorción
C1	$C < 0,15$
C2	$0,1 < C < 0,25$
C3	$0,2 < C < 0,4$
C4	$0,3 < C < 0,7$
C5	$0,5 < C < 1,2$
C6	$C > 1,0$

Tabla II.3: Neno Pascoa (2012) Clasificación MERUC y requisitos para la atribución del certificado CSTBat (según Veiga 2001^a y Biga & Abrantes (2003) citados en Flores Colen (2009)

Diversos estudios hacen una relación de los valores máximos a definir con respecto a las propiedades de los materiales para su exposición fuerte a la lluvia: clase 1 o 2, con ambientes de contenido de humedad ambiental +80% o 5C<T<12C: clase 1 a 3 o altura de la pared revocada < 3m con proximidad de árboles: clase 1

Absorción de agua por total inmersión

La absorción de agua es la diferencia entre el peso de una muestra totalmente inmersa en agua y su peso seco. En contraste a la absorción de agua por capilaridad, el valor de la absorción total puede ser determinado por métodos diferentes. Se mide en $[g/m^2s^{0.5}]$

Existen diferentes tipos de ensayos según la cantidad de agua y tiempo al que la probeta esté sometida.

WS Absorción de agua por inmersión parcial en tiempo corto

WL(P) Absorción de agua por inmersión parcial en tiempo largo

WL(T) Absorción de agua por inmersión total en tiempo largo

Esta propiedad está relacionada intrínsecamente con el mojado de los materiales y consecuentemente con el cerramiento en su conjunto.

Factor de resistencia al vapor de agua (μ)

El factor de resistencia al vapor de agua se define como el cociente entre el coeficiente de difusión del vapor de agua en el aire inmóvil y la permeabilidad al vapor de agua a través de un material poroso. Es un parámetro adimensional. Indica la resistencia que opone el material al paso del vapor de agua.

$$\mu = \frac{D_p}{\delta_p} \quad \text{Unidades: [-]}$$

Dónde:

Dp [kg/m s Pa] Coeficiente de difusión del vapor de agua

δ_p [kg/m s Pa] Permeabilidad al vapor de agua EN ISO 12572:2002

Para el aire inmóvil, este valor es 1. Este valor puede llegar al infinito cuando un material impide el transporte de vapor de agua a través del mismo. Este parámetro mide la capacidad de permitir el paso del vapor de agua. Está íntimamente relacionado con la porosidad abierta contenida en dicho material, la cantidad de poros interconectados que atraviesan completamente el material y grado de tortuosidad de su recorrido.

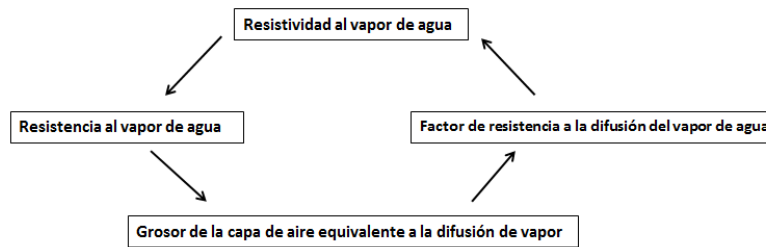


Figura II.21: Relación entre magnitudes físicas

Isoterma de sorción, describe el almacenamiento de humedad de un material en el rango higroscópico. Esta curva se puede obtener utilizando diferentes métodos. Los métodos de tipo gravimétrico, utilizados preferentemente en los materiales en la edificación, seguidos por el procedimiento descrito en la EN ISO 12571:2000

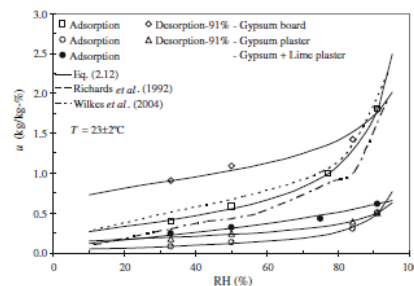


Fig. 2.10 Sorption isotherms for three types of plaster tested and comparison with other results, presented in literature, for the case of gypsum board

Figura II.22: Curvas de sorción de tres tipos de yeso (Delgado J et al, 2013)

El contenido de humedad en la región super-higroscópica es normalmente definida usando curvas de succión. Estas curvas de succión se determinan utilizando medidas con placas de presión.

Caracterización térmica de materiales y transferencia de calor

El parámetro determinante para la caracterización térmica es la temperatura. La Real Academia de la Lengua define **temperatura** como una magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o de un ambiente, y cuya unidad en el sistema internacional de medidas es el Kelvin [K].

En la situación que se analiza, la de un cerramiento vertical que separa dos ambientes uno exterior y otro interior, cada uno de ellos posee un nivel de calor diferente. Además la temperatura de los materiales que componen el cerramiento será diferente, gradando la diferencia entre los ambientes. Se está, por tanto, separando diferentes temperaturas.

Consecuentemente estas diferencias de temperaturas producen un movimiento de flujo de calor, llevando éste de la mayor cantidad de calor a la menor mediante conducción, convección o radiación.

Transferencia de calor

Conducción. Es un tipo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia y por actividad molecular. Las moléculas con mayor energía cinética cederían a las moléculas de menor energía produciéndose un flujo de calor desde la temperatura más alta a la más baja.

Ley de conducción de calor de Fourier se expresa

$$q_{\text{cond}} = -\lambda \nabla T$$

Dónde:

q	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor por conducción
λ	[W/mK]	Conductividad térmica del material
T	[°C]	Temperatura
∇	[-]	Operador diferencial vectorial

El signo negativo en la ley de Fourier indica que el calor fluye en sentido contrario al del gradiente de temperaturas.

Convección. Es un mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida por las diferentes densidades de la sustancia o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lado a otro.

El modelo de transferencia de calor por convección se denomina Ley de enfriamiento de Newton.

$$q_{\text{conv}} = h_c A (T_A - T)$$

Dónde:

h_c	[W/m ² K]	Coeficiente de transferencia de calor por convección
A	[m ²]	Superficie que entrega calor con una temperatura
T_A	[°C]	Temperatura adyacente
T	[°C]	Temperatura

Radiación. Se propaga la energía a través de las ondas electromagnéticas. La cantidad de energía radiante emitida viene expresada por la Ley de Stefan-Boltzmann.

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon (\sigma T^4) A$$

Dónde:

q_{rad}	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor radiado
ε	[-]	Emisividad
σ	[W/m ² K ⁴]	Constante de Stefan-Boltzmann 5.67 E ⁻⁸
T	[°C]	Temperatura superficial del objeto
A	[m ²]	Superficie que radia

En el caso de las edificaciones, la radiación solar total es la suma de las siguientes contribuciones (Balcomb, 1992)

1. Radiación directa normal
2. Radiación difusa del cielo
3. Radiación reflejada

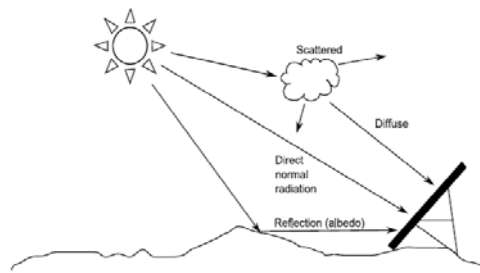


Figura II.23: Tipos de radiaciones que llegan a una superficie

En el caso de un material, se asume que la transferencia de calor a través de ella es el resultado de las contribuciones de la conducción de la fase sólida y del fluido, de la convección y la radiación. (Treschel, 1994)

$$q_t = q_{cond} + q_{conv} + q_{rad}$$

Donde $q_{cond} = q_s + q_g$ son las densidades de flujo correspondiendo al estado sólido y al estado gaseoso.

Se podría deducir que la densidad el flujo de calor a través de un material poroso puede ser expresado como:

$$q_t = -\lambda^* \frac{dT}{dx}$$

Con:

$$\lambda^* = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_{conv} + \lambda_{rad}$$

Dónde:

λ^*	[W/m K]	Conductividad térmica aparente
λ_s	[W/m K]	Conductividad térmica de la conducción sólida
λ_g	[W/m K]	Conductividad térmica de la conducción del gas
λ_{conv}	[W/m K]	Conductividad térmica de la convección
λ_{rad}	[W/m K]	Conductividad térmica de la radiación

Se observa que depende de la diferencia de temperaturas y de un parámetro característico de los materiales denominado conductividad térmica, que indica la mayor o menor facilidad del paso del flujo de calor a través de él. El concepto de **conductividad térmica aparente** define a los materiales heterogéneos. Este parámetro tiene en consideración los modos adicionales de transferencia de calor de convección y radiación.

En aislamientos convencionales, con diámetros de poro más grandes que 1mm, la parte convectiva de la transferencia de calor puede significar una proporción elevada sobre el valor final de la conductividad térmica. Con poros más pequeños, este fenómeno se reduce. En los

materiales de aislamiento fibrosos, la contribución fundamental son de la conducción sólida y gaseosa y radiación. (Hall, 2010)

Pero en la realidad cuando se somete a un material húmedo a una diferencia de temperatura se produce un movimiento de agua en estado vapor y líquida que contribuye también en el valor de la conductividad térmica. En el caso dinámico, puede medirse sólo la **conductividad térmica equivalente** y tiene en consideración estos movimientos de agua. (Treschel, 1994)

$$\lambda_{eq} = \lambda^* + \rho_l h_l a$$

Dónde:

λ_{eq}	[W/m K]	Conductividad térmica equivalente
λ^*	[W/m K]	Conductividad térmica aparente
ρ_l	[Kg/m ³]	Densidad del agua
h_l	[J/kg]	Calor latente de vaporización
a	[m ² /s]	Difusividad térmica del vapor de agua

Transmitancia térmica o valor U

Teniendo en consideración el estado estacionario, normalmente para realizar cálculos energéticos en los cerramientos se utiliza un parámetro representativo denominado **transmitancia térmica o valor U**. Se define la transmitancia térmica como un parámetro térmico característico de un material o conjunto de materiales que nos permite conocer cuál es la densidad de tasa de flujo de calor que es capaz de transmitir por unidad de superficie a su otra cara cuando existe una diferencia térmica de 1º Kelvin.

$$\frac{Q}{A} = q = U \Delta T$$

Dónde:

Q	[W]	Flujo de calor por conducción
A	[m ²]	Área
q	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor por conducción
U	[W/m ² K]	Transmitancia térmica
T	[°C]	Temperatura
Δ	[-]	Operador de incremento de variable

Este parámetro es muy útil, puesto que ayuda a determinar la cantidad de flujo de calor que se podría perder en la envolvente de la edificación. Si se tiene un cerramiento que no transmite flujo de calor, el calor será retenido y no será necesario aportar energía para elevar y/o rebajar la temperatura interior, creando una sensación de confort sin consumo de energía. Es, en

definitiva, muy importante ya que se correlaciona con la energía necesaria para la calefacción y/o refrigeración del edificio.

El valor de transmitancia térmica se puede obtener mediante mediciones. Para **definir la transmitancia térmica U in-situ** se usa el estándar ISO 9869:2014 mediante la utilización de aparatos denominados termoflujómetros.

A las mediciones recogidas se le aplica normalmente el “*método de la media*”. Este método proporciona información cualitativa y cuantitativa sobre la medición de datos y permite estimar para experimentos suficientemente largos, algunos de los parámetros de los componentes del edificio como el valor U de un muro. La fórmula de abajo mostrada da una estimación del valor U por el “*método de la media*”

$$U = \frac{\sum_{j=1}^N q_j}{\sum_{j=1}^N (T_{i,j} - T_{a,j})} \quad \text{Unidades: [W/m}^2\text{K]}$$

Dónde:

j	[-]	Índice de cada observación
q	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor a través del componente
T _i	[°C]	Temperatura del interior
T _a	[°C]	Temperatura ambiental

Cuando la estimación es calculada después de cada medida, se observa una convergencia a un valor asintótico. Si se considera la temperatura superficial exterior e interior la ecuación anterior se convierte en conductancia térmica C obtenida como sigue:

$$C = \frac{\sum_{j=1}^N Q_j}{\sum_{j=1}^N (T_{wi,j} - T_{a,jce,j})} \quad \text{Unidades: [W/m}^2\text{K]}$$

j	[-]	Índice de cada observación
q	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor a través del componente
T _{wi}	[°C]	Temperatura de la superficie interna
T _{ce}	[°C]	Temperatura de la superficie externa

En la actualidad está vigente el estándar UNE EN ISO 6946:2012 que proporciona el **método de cálculo de la transmitancia térmica** de los componentes y elementos de un edificio. La formulación física del valor de la transmitancia térmica viene definida por:

$$U = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{si} + R_{se} + R_c} \quad \text{Unidades: [W/m}^2\text{K]}$$

Dónde:

e	[m]	Espesor del material
---	-----	----------------------

λ	[W/mK]	Conductividad térmica del material
R	[m ² K/W]	Resistencia térmica combinada de radiación y convección

Los subíndices corresponden a la superficie interior si, superficie exterior se y la cámara c.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{Unidades: [m}^2\text{K/W]}$$

Dónde:

e	[m]	Espesor del material
λ	[W/mK]	Conductividad térmica del material

El cálculo del valor de la transmitancia térmica se realiza del ambiente interior al ambiente exterior, teniendo en consideración no sólo la resistencia de cada uno de los materiales dispuestos en el cerramiento sino también la contribución de la convección y radiación de las superficies en contacto con el interior y el exterior.

La parte de convección dependerá de la geometría (forma y orientación de la superficie), propiedades del material (rugosidad superficial), propiedades del fluido (viscosidad), velocidad de la corriente (rapidez y dirección) y la temperatura del volumen del fluido y la superficie. Esto determinará si el flujo sobre la superficie es una corriente dirigida o forzada, laminar o turbulenta, o de hecho, una combinación de ellas. La parte de radiación combina la radiación directa, difusa y reflejada. Debido a su complejidad para la determinación se utiliza cálculos simplificados empíricos. (Hens, 2012)

Para ello se define las resistencias superficiales exterior e interior R_{se} y R_{si} , resistencias térmicas. Los valores introducidos en el cálculo de R_{se} y R_{si} están basados normalmente en valores asumidos de la experiencia y por ensayos realizados. La asignación de este valor en el cálculo para la transmitancia térmica es reflejada en una tabla de un Documento de apoyo del Código Técnico de la Edificación en función de la posición del cerramiento, dirección del flujo de calor y su situación en el edificio y que puede verse en la tabla II.4

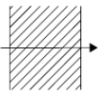
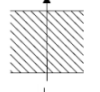
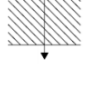
Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor		R_{se}	R_{si}
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal >60° y flujo Horizontal		0,04	0,13
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal ≤60° y flujo ascendente (Techo)		0,04	0,10
Cerramientos horizontales y flujo descendente (Suelo)		0,04	0,17

Tabla II.4: Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en m²K/W. Tomado de CTE DA DB HE-1

Sin embargo, estos valores son simplificaciones de comportamientos más complejos. Es por ello que otras normas o manuales referencien formulaciones de base empírica o valores similares, véase EN 15026 o CIBSE Guide C (2007). En concreto el manual de la ASHRAE, para designar el valor exterior, distingue entre verano e invierno siendo el invierno mayor debido a

la consideración de una velocidad de viento más elevada. Mediciones realizadas indican que si la fachada está en sentido contrario a la dirección dominante del viento, los valores de la tabla pueden ser considerados mucho más bajos.

	Dirección del flujo de calor	h_e (W/m ² K)
Invierno (velocidad de viento 6.7 m/s)	Cualquiera	34.0
Verano (velocidad de viento 3.4 m/s)	Cualquiera	22.7

Tabla II.5: Valor de h_e para el cálculo de la transmitancia térmica. ASHRAE Handbook of Fundamentals en Hens, 2012

Se concluye, que si bien estos valores se incorporan a la fórmula como un parámetro fijo, se observa que la variabilidad de las condiciones reales puede alterar de forma importante el valor final de la transmitancia térmica.

En la formulación de este valor, además del espesor de los materiales, se utiliza el coeficiente de conductividad térmica, propiedad térmica intrínseca de los materiales sobre la capacidad de transmitir calor y ya definido anteriormente.

Este valor del **coeficiente de conductividad térmica λ** o lambda de los materiales puede ser obtenido mediante tablas o procedimientos de ensayo. La normativa UNE EN ISO 10456:2012 expresa valores tabulados y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño.

Para obtener el valor declarado de la conductividad térmica hay dos posibilidades. La primera con temperatura 10°C y la segunda con temperatura de 23°C. Para las dos se establecen las condiciones de humedad. En la primera temperatura se habla de contenido de humedad bajo conseguido mediante secado. En el segundo caso con la temperatura a 23°C, se establece una humedad relativa del 50% +/- 10%.

Los estándares definen el valor de **conductividad térmica declarada** como un valor estadístico estimado en la industria y un valor de diseño, como valor definido para unas condiciones finales de uso. La comunidad científica lo conoce pero no queda clara su cuantificación, ya que son variables las condiciones ambientales donde se localiza el edificio.

Es, por tanto, importante calcular la **conductividad térmica corregida o de diseño**. La normativa UNE EN ISO 10456:2012 indica la forma de hacerlo:

$$\lambda = \lambda_d F_T F_m F_a \quad \text{Unidades: [W/mK]}$$

Donde λ_d es la conductividad térmica declarada de un material de edificación bajo condiciones secas de humedad y F_T y F_m son los coeficientes de conversión de temperatura y humedad, respectivamente y F_a de envejecimiento.

En el clima que nos ocupa, y debido a las bajas variaciones térmicas, el efecto de la humedad en los materiales porosos para la edificación es bastante importante y no considerarlo puede llevar a errores importantes en la transferencia de calor. Además la conductividad de diseño será diferente dependiendo de la aplicación final del material.

En el caso de la conductividad térmica λ envejecida declarada. Valor envejecido a 25 años. En un hecho que para un aislamiento térmico con composición de un gas en el interior, se debe tener en cuenta el efecto del envejecimiento que produce los cambios en la composición del gas interior para la propiedad de conductividad térmica. Esta se denomina conductividad térmica envejecida declarada, que en el caso de los aislamientos PUR/PIR su norma de aplicación es la **UNE EN 14315-1:2013**. Se exponen dos procedimientos a seguir y se obtiene una predicción de envejecimiento a 25 años. Para estos casos, los estadounidenses y canadienses poseen sus normas **ASTM 1303-95 y CAN/ULC-S770** que determinan el parámetro *Long Term Thermal Resistance* (en inglés **LTTR**). Se evalúan los cambios que se producen en la composición del gas contenidas en las celdas y como se deteriora el agente de relleno causado por la difusión del aire dentro del material. El ensayo es de laboratorio y simula un envejecimiento de 15 años.

En vez de realizar un factor de corrección, existen también métodos de ensayo para calcular la **conductividad térmica de un material húmedo**. En la actualidad está vigente la norma **ISO 10051:1996** para la determinación de transmitancia térmica de un material húmedo. Esta norma expone la forma de determinar experimentalmente la conductividad térmica atendiendo a condiciones de contenidos de humedad.

Estado estacionario y estado dinámico

El valor U es una aproximación en estado estacionario, es decir, donde las diferencias de temperaturas entre el ambiente exterior e interior de un edificio se plantean estables.

La situación real difiere de este enfoque, ya que el cerramiento posee una respuesta dinámica porque sus condiciones de contorno son variables a lo largo del día. Así, dos fachadas iguales, aún con el mismo valor U, podrían tener un diferente comportamiento térmico dinámico diario.

En este estado dinámico, se expresa el parámetro de **admitancia térmica** como la capacidad de almacenamiento térmico de un material, es decir, la capacidad de un material para almacenar y liberar calor durante un período de tiempo, típicamente 24 horas. Este concepto usa las mismas unidades de medida que la transmitancia térmica. Un alto valor de valor de la admitancia térmica supondrá una alta la masa térmica.

Técnicamente existen diversas definiciones y procesos de cálculo como los incluidos en el estándar UNE EN ISO 13786:2011 o los recogidos en el método de cálculo de la admitancia térmica de la guía de Chartered Institution of Building Services Engineers CIBSE guide A Environment Design

Para determinar la inercia térmica, las propiedades de los materiales utilizadas son su densidad (ρ), su calor específico (c) y su coeficiente de conductividad térmica (λ).

Se define el calor específico o capacidad calorífica específica c a una magnitud física que se define como la cantidad de calor que necesita un Kilogramo para que su temperatura se eleve un grado centígrado.

Con estas propiedades de los materiales se obtienen indicadores para el comportamiento dinámico del cerramiento y que son la difusividad térmica a y efusividad ef

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad \text{Unidades: [m}^2/\text{s]}$$

$$ef = \sqrt{\lambda \rho c_p} \quad \text{Unidades: [Ws}^{1/2}/\text{m}^2\text{K]}$$

Dónde:

λ	[W/mK]	Coefficiente de conductividad térmica
ρ	[kg/m ³]	Densidad
c_p	[J/kgK]	Calor específico o capacidad térmica específica

Materiales con altos valores de difusividad térmica transmiten más rápidamente las fluctuaciones de los flujos de calor que los materiales con valores bajos, mientras que valores altos de efusividad absorberá más fácilmente un flujo de calor de superficie.

Aquí se tiene en consideración el tiempo y la respuesta de los materiales a estos cambios de temperatura. La inercia del muro soporte, es decir, el tiempo de reacción para transmitir por conducción el calor variará dependiendo del material a considerar. La inercia térmica conlleva los dos fenómenos, la amortiguación en la variación de las temperaturas y el retardo de la temperatura interior respecto a la exterior:

-Amortiguación: “*en inglés decrement factor*” el ratio de las amplitudes del flujo de calor externo y de la onda de propagación interna. La amortiguación depende de conductividad térmica, densidad, espesor, calor específico y del periodo de 24 horas. Se realiza cuando las condiciones exteriores cambian, por ejemplo, deja de darle el sol y baja la temperatura.

-Retardo o desfase de la onda térmica: “*en inglés time lag*” es el tiempo en horas necesario de la onda térmica para fluir desde su superficie exterior al interior. El desfase depende de las mismas propiedades que la amortiguación. Los desfases mayores son con los materiales más densos, los de mayor espesor, con el calor específico más alto y una baja conductividad térmica.

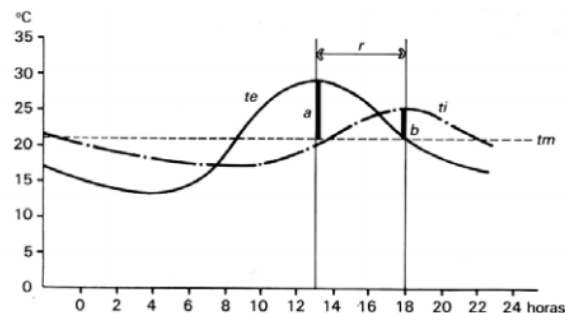


Figura II.24: Parámetros de inercia térmica. Amortiguación b/a (*decrement factor*) y retardo térmico r (*time lag*)

Un buen elemento constructivo, desde el punto de vista del confort de verano, es aquel que tiene valores bajos de factor de amortiguación, valores altos de retardo temporal y valores bajos de admitancia térmica.

Sin embargo, el estudio de este parámetro no se ha considerado como objetivo de esta tesis doctoral.

Para finalizar, en todo este apartado segundo del capítulo II, **se han expuesto las propiedades características de los materiales tanto hídricas como térmicas**, principalmente la absorción de agua líquida para el mojado, la permeabilidad al vapor de agua para el secado, la curva de sorción y la conductividad térmica. Son propiedades que intervienen significativamente en el comportamiento higrotérmico del cerramiento. Resta averiguar cómo estas propiedades características de cada material se comportarán cuando se dispongan unidos e interfieran entre ellos. Este problema, entre otros, es el abordado en el siguiente capítulo de variables constructivo-arquitectónicas.

II.1.3 CONSTRUCTIVO-ARQUITECTÓNICAS

La **envolvente en la edificación** es sumamente importante. El investigador (Hutcheon, 1963) indicaba que su función principal es proporcionar una barrera entre el ambiente interior y exterior, de tal forma que las condiciones interiores puedan ser ajustadas y mantenidas dentro de unos límites aceptables.

La legislación española establece actualmente los principales requerimientos para una envolvente y que son controlar el flujo de calor, flujo de aire, flujo de vapor de agua, penetración de agua, luz, radiación solar, ruido, fuego, proporcionar dureza y rigidez, ser durable, estéticamente agradable y económico. Para realizar este control, debería existir una **barrera de aire** de control del flujo de aire, una **barrera térmica** de control del flujo de calor, una **barrera contra la intemperie** para prevenir la entrada de agua y una **barrera de vapor** de control del flujo de vapor de agua.

Las **barreras de aire** paran el aire exterior que pretenda acceder al edificio a través del cerramiento y que el aire interior se filtre hacia el exterior. En el caso de las **barreras térmicas** se seleccionan los materiales con propiedades para reducir la transferencia de calor por conducción principalmente hacia el exterior. Esta barrera deberá ser lo más continua posible para evitar puentes térmicos.

En el caso del control del agua y la humedad, se utiliza la **barrera contra la intemperie**. Es una barrera que es llamada también plano de drenaje o barrera resistente al agua. En el caso de este tipo de fachada, el agua puede penetrar a través de las juntas del aplacado exterior a través de diferentes fuerzas explicadas en la figura que se expone a continuación.

La **barrera de vapor** es un material que retrasa la difusión del vapor de agua, desde el ambiente interior. Un material que actúe como una barrera de vapor de agua debe tener una baja permeabilidad al paso del vapor de agua. En EE.UU, el Código Internacional Residencial (IRC) define el rango de permeancia de vapor de agua y los clasifica en tres clases: Clase I: ≤ 0.1 perms (llamado impermeable). Clase II: 0.1 to 1.0 perms (llamado semi-impermeable). Clase III: 1.0 perm to 10 perms (llamado semi-permeable). Por la clasificación climática es definida un rango de permeancia de vapor de agua.

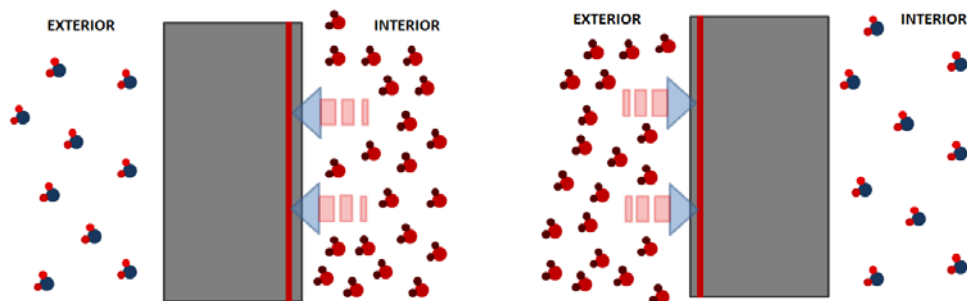


Figura II.25: Posición típica de la barrera impermeable al vapor de agua según climas: 1º Climas fríos, barrera hacia el interior, 2º Climas calientes, barrera hacia el exterior. (Adaptado según DuPont Tyvek, 2006)

Se plantea por tanto, la dificultad en la elección de los materiales adecuados para cumplir las funciones explicadas anteriormente y la posible influencia que supone la posición de cada material dentro del cerramiento.

Estrategias de control de agua y humedad: “breathability” o transpirabilidad del cerramiento

Para definir una envolvente es necesaria una estrategia adecuada en la elección y en la disposición de los materiales. Una de las estrategias posibles para climas lluviosos y húmedos, según los investigadores, es la transpirabilidad. La transpirabilidad es la habilidad de un cerramiento para regular la humedad, para adsorberla y luego cederla, evitando así una situación en la que el vapor de agua sea retenido por el cerramiento de un edificio. La transpirabilidad no está relacionada con la filtración de aire.

Un "muro transpirable" se compone de una gradación de materiales permeables al vapor. Los materiales hacia el interior serán menos permeables al vapor que los materiales hacia el exterior.

La transpirabilidad no sólo es como el agua se mueve a través del cerramiento (permeabilidad al vapor de agua) sino también sobre la habilidad de los materiales para adsorber y ceder el vapor (higroscopicidad) y sobre la habilidad de los materiales para absorber y ceder el agua como líquido (capilaridad).

Un sistema transpirable o regulador de humedad es aquel que **tiene esencialmente 3 mecanismos:**

a) Permeabilidad al vapor de agua

(El paso del vapor de agua a través de la construcción)

b) Higroscopicidad

(La adsorción y la cesión del vapor de agua de los materiales de construcción)

c) Capilaridad

(La absorción y desorción del agua como líquido en los materiales de construcción)

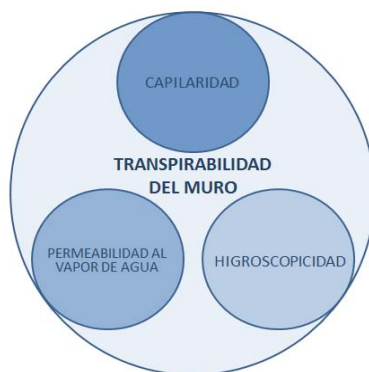


Figura II.26: Conceptos que definen la transpirabilidad “breathability”

a) Permeabilidad al vapor de agua

Es la cantidad de vapor de agua que atraviesa en la unidad de tiempo la unidad de superficie de un material de espesor unidad cuando la diferencia de presiones de vapor es de una

unidad. Su designación es δ y las unidades en S.I. [Kg/m.s.Pa]. Representa la facilidad con que un material deja atravesarse por vapor de agua.

En un *muro transpirable* ¿Cómo se debería mover el vapor de agua a través del cerramiento?

Se puede reducir el riesgo de condensaciones intersticiales graduando la permeabilidad al vapor de agua de los materiales de construcción. Para ello se sitúan los materiales de mayor resistencia (o menor permeabilidad) al vapor lo más cerca posible del espacio interior. Y al contrario, situar los materiales de menor resistencia (o mayor permeabilidad) al vapor lo más cerca posible del espacio exterior. La gradación de materiales permeables al vapor sería aproximadamente 5: 1 que es la relación mínima a menudo citada. Esta característica está intrínsecamente ligada al secado del cerramiento.

En este sentido la guía A de CISBE: 2015, expone que además de graduar el nivel de permeabilidad al vapor de agua del cerramiento, deberá controlarse paralelamente los valores de resistencia térmica de los materiales, según la figura que abajo se representa. El motivo es controlar que se produzcan condensaciones.



Figura II.27: Gradación de la permeabilidad al vapor de agua y de la resistencia térmica para los materiales del cerramiento. Adaptado de CISBE Guide A: 2015

b) Higroscopicidad

Es la capacidad de los materiales para **adsorber y ceder el vapor de agua como gas**. Se relaciona con la estructura física micro-porosa. Los materiales con buena capacidad higroscópica pueden estabilizar la humedad del aire interior.

La capacidad higroscópica de un material está relacionada con su contenido de humedad de equilibrio. En inglés Equilibrium Moisture Content (EMC) significa un contenido de humedad de un material a una temperatura y una humedad fija del ambiente. El mecanismo higroscópico funciona hasta el 95% de humedad relativa. Las tablas de capacidad de humedad de un material se expresan como la **curva/isoterma de sorción de un material**

c) Capilaridad

Es la capacidad de los materiales para **absorber y ceder el agua líquida**. Es la masa de agua que absorbe una superficie en un tiempo determinado. El parámetro definido es la absorción de agua por capilaridad denominado W y unidades en el S.I. [Kg/m² min^{0,5}]

Existen diferentes tipos de ensayos según la cantidad de agua y tiempo al que la probeta esté sometida.

- WS Absorción de agua por inmersión parcial en tiempo corto
- WL(P) Absorción de agua por inmersión parcial en tiempo largo
- WL(T) Absorción de agua por inmersión total en tiempo largo

Esta propiedad está relacionada intrínsecamente con el mojado de los materiales y consecuentemente con el cerramiento en su conjunto.

Estrategias de control de aire: “airtightness” o estanqueidad del cerramiento

Otra estrategia no menos importante para el adecuado funcionamiento de la envolvente es su estanqueidad. Este concepto de fugas de aire o permeabilidad al aire difiere de la transpirabilidad. La hermeticidad es una cualidad del cerramiento de ser estanco al paso del aire. El paso de aire a través de juntas o huecos en una fábrica puede convertirse en una significativa pérdida de energía. Se mejorará el comportamiento energético si se consigue hacer el edificio que ingrese la mínima cantidad de aire a su través. Estos movimientos de aire son producidos por diferencias de presión de aire como el efecto chimenea, la presurización, los ciclos de viento y de presión barométrica y los ciclos térmicos.

En Alemania existe la norma DIN 4108-7:2011-1 Parte 7 *Thermal insulation and energy economy in buildings. Airtightness of buildings. Requirements, recommendations and examples for planning and performance*. En ella se desarrolla los requerimientos necesarios para cumplir la estanqueidad en toda la composición de los cerramientos de los edificios.

En España, el Código Técnico de la Edificación C.T.E. en su documento DB HE Ahorro de Energía, únicamente trata la permeabilidad al aire referida a carpinterías, no al tramo ciego. Limita su valor en $50 \text{ m}^3/\text{h m}^2$ ($5 \text{ l}/\text{cm}^2$ en una hora) para las zonas de clima suave en invierno (A y B), y $27 \text{ m}^3/\text{h m}^2$ ($2,7 \text{ l}/\text{cm}^2$ en una hora) para las zonas de clima más severo (C, D y E). Se cuantifica las filtraciones de aire en los elementos practicables pero no en la resolución de las juntas entre estos y el tramo ciego, o en la unión entre las piezas que conforman propiamente dicho tramo. Se da por sentado que esta parte del cerramiento es absolutamente estanca al paso del aire.

Estas estrategias de transpirabilidad y hermeticidad pueden ser utilizadas durante el proceso de diseño y ejecución para afrontar un mejor comportamiento higrotérmico del cerramiento. Sin embargo, estas estrategias suponen tener en consideración un conjunto de parámetros interrelacionados entre sí y de muy diverso origen que hacen variar el comportamiento.

La solución de la fachada ventilada de granito

Una fachada ventilada es, a grosso modo, una envolvente que deberá cumplir las prestaciones anteriormente indicadas. Está formada por un conjunto de elementos constructivos dispuestos de un determinado orden en los que consta de un material en contacto con el exterior, actuando como sombrilla y/o paraguas, una cámara de aire inmediata a este material. Resta un aislamiento y un muro soporte.

La categoría de la “fachada ventilada” incluye a los sistemas que tienen diseñada una cámara de aire para **crear una discontinuidad** entre el interior y a la vez exterior. Debido a las juntas abiertas creadas en el material en contacto con el exterior, **se genera una especie de ventilación en una dirección** que contribuye al intercambio de aire.

Este tipo de sistema constructivo de cerramiento tiene numerosos nombres en distintos países del mundo que da como resultado una dificultad de búsqueda en la bibliografía especializada, además de las particularidades constructivas de cada país: *rainscreen wall*, *pressure equalized rainscreen*, *back ventilated cavity*, *two-stage weather tightening*, *hinterlüftete fassade*, *Vorgehängte Hinterlüftete Fassaden (VHF)*, *Außenwandbekleidungen*, fachada-cortina, etc. Esto quizás ha debido ser por las diferentes funciones que este tipo de fachada desarrolla y/o para remarcar alguna de ellas (muro que para lluvia, presión ecualizada de la cámara, etc...). Los tipos de materiales dispuestos en cada tipo indicado suelen ser diferentes e identificativos, correlacionando por ejemplo el rainscreen wall en países anglosajones con materiales como la madera.

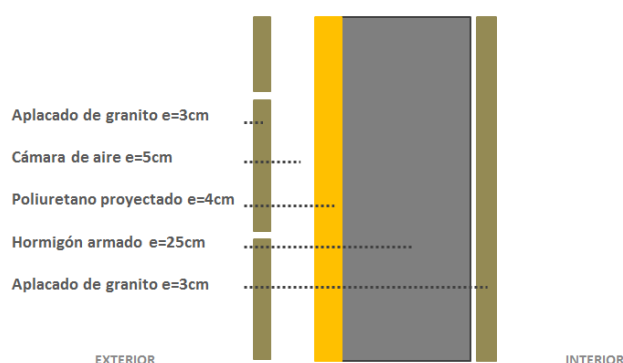


Figura II.28: Cerramiento de fachada ventilada de granito analizada

La normativa

No todos los países han desarrollado normas de este tipo de fachada. Se han destacado dos: la norma alemana y el estándar inglés.

En Alemania, pioneros en la estandarización en Europa, en 1990 la fachada ya tenía su propia norma. Actualmente están en continua modificación y corrección y son las siguientes: DIN 18516 Revestimiento de cerramientos exteriores ventilados por la parte posterior. Parte I Requisitos y ensayos. Parte III La piedra natural, los requisitos y el diseño. Parte V La piedra artificial, los requisitos y el diseño.

En Gran Bretaña, la publicación técnica británica *Standard for walls with ventilated rainscreen* del *Centre for Window and Cladding Technology, CWCT* de la Universidad de Bath, pretendía establecer unos estándares homogéneos en el país sobre este tipo de solución de fachada. Fue publicada en 1998.

Sin embargo, una de las primeras definiciones en Europa fue realizada por Directives communes pour l'agrément des Façades Legeres de 1968, del Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB): *una fachada que se comunica con el exterior a través de*

orificios que posibilitan una ventilación permanente de abajo a arriba. (Siqueira Junior, 2003)
Este organismo también elaboró normativa para este tipo de fachadas.

En América, otro país para destacar en función de los estudios y estandarización sobre la fachada ventilada es Canadá. País que durante la primera mitad del siglo XX tuvo una presencia activa en investigaciones de procesos físicos para la mejora de las viviendas. En el instituto de investigación canadiense NRC-IRC, uno de estos investigadores, en concreto Kerby Garden (1963), puso en la palestra el antecedente del sistema constructivo de fachada ventilada, denominado *rainscreen wall*, importante solución de revestimiento exterior para este país por las condiciones climáticas existentes. Documento de investigación publicado que junto con otros ayudaría a la elaboración durante los años 60 de los primeros códigos de la edificación en Canadá.

Partes de una fachada ventilada

La fachada ventilada es un cerramiento multicapa que posee tres partes diferenciadas: una parte soporte, una cámara de aire y un acabado de protección exterior sujeto.

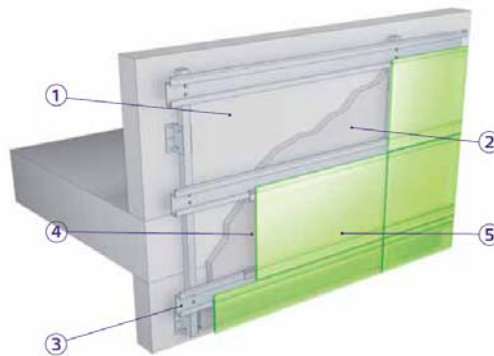


Figura II.29: Partes de una fachada ventilada (Ascer, 2010)

1. Parte soporte
2. Aislamiento térmico
3. Subestructura
4. Cámara de aire
5. Protección exterior

Parte soporte

Este primer componente de la fachada es el que está en contacto con el ambiente interior. La norma americana ASTM C1242 - 12 "**Standard Guide for Selection, Design, and Installation of Dimension Stone Attachment Systems**", define esta capa soporte *como la subestructura capaz de transmitir a la estructura del edificio las cargas que inciden sobre las placas de piedra*, pudiendo ser la propia estructura una pared de fábrica, de paneles de acero o de hormigón in situ o prefabricado.

Los británicos en su publicación técnica realizada en 1998 "**Standard for walls with ventilated rainscreen del Centre for Window and Cladding Technology, CWCT**" expone que *el muro trasero es de vital importancia en el funcionamiento de los sistemas de fachada ventilada. Evita el movimiento de aire si es excesivo.*

Autores como (Pardal y Paricio, 2006) indican sobre la parte soporte que además de garantizar la estanqueidad al aire de la fachada y realizar una función estructural, también *será la encargada de soportar el aislamiento térmico y colaborar con el mismo para aportar inercia térmica, mejorar el aislamiento acústico, facilitar el paso de las instalaciones, proteger del fuego, mejorar la seguridad de intrusión y contribuir a una tercera barrera al paso del agua previniendo un fallo ocasional de las anteriores.*

Esta capa soporte también es denominada hoja interior por la posición constructiva en la que se encuentra. Esta hoja interior puede, dependiendo de los materiales de que se compongan, ser pesada o ligera. En el caso que la hoja interior sea ligera, los materiales suelen ser el ladrillo macizo o perforado, el hormigón y el bloque de hormigón. La hoja interior ligera se suele realizar con un tabique autoportante de yeso laminado y aislamiento de lana mineral, aunque la capa en contacto con el exterior se dispone de una placa más resistente a la humedad como las de cemento, fibras o metálica. Si bien es cierto que en este caso la subestructura de cuelgue del revestimiento exterior suele anclarse a los forjados perdiendo así su función de capa soporte.

Aislamiento térmico

Es otro componente de la fachada ventilada cuya función es controlar térmicamente el edificio, tanto sea evitar pérdidas como ganancias térmicas. Habitualmente el aislamiento se coloca en la cara fría, en contacto con la capa soporte, si bien otras soluciones en otros tipos de fachada son posibles. La continuidad es fundamental a la hora de disponerlo ya que se suprimen los puentes térmicos, se evitan variaciones de temperatura, se minimizan movimientos térmicos diferenciales responsables de la diferente temperatura en su superficie.

Aislante	Espesor (mm)	Densidad (kg/m³)	Conductividad λ (W/m K)	Factor de Resistencia a la transmisión de vapor de agua μ (*)	Resistencia compresión KPa	Absorción de agua en volumen	Reacción al fuego (**)	Norma	Coste energético (MJ/Kg) (***)
Lana mineral 15 clases	30 - 200	40 - 200	0,031 - 0,041	1	0'5 - 500	No hidrófilo	A1	UNE EN 13162	18
Lana de vidrio 9 clases	9 - 200	10 - 90	0,034 - 0,042	1	—	—	A1	UNE 92102	—
Poliestireno expandido Tipos I a VII	20 - 50	10 - 50	0,029 - 0,046	60	65 - 250	1 - 5 %	D-S3, do Ignif:B-S3, do	UNE EN 13163	120
Poliestireno extrudido Tipos II a VI	30 - 120	20 - 65	0,034	150	100-1000	0,3-0'5 %	D-S3, do Ignif:B-S3, do	UNE EN 13164	100
Poliuretano en placas Tipos I a IV	≥ 30	28 - 55	0,025-0,040	60	170 - 290	Impermeable	D-S3, do Ignif:B-S3, do	UNE 53351 UNE EN 13165	70
Poliuretano proyectado	20-50	30 - 50	0'032-0'035	60	200	Impermeable	D-S3, do Ignif:B-S3, do	UNE 92120	70
Corcho	40-300	90-140	0,037	5-10	500	<0'3%	—	UNE EN 13170	—
Vidrio celular	12 - 40	100-150	0,050	Impermeable 10 ⁶	400 - 1600	Impermeable	A1	UNE EN 13167	—

— indica que no se dispone de este dato
 (*) μ : es un coeficiente adimensional. Cociente entre la resistividad al vapor del material y la resistividad al vapor de agua del aire en reposo (r_v del aire en reposo: 5'5 MN.s/gm= 0'004mmHg.m²/día/gcm).
 (**) Clases de reacción al fuego: Pto.1.2.2.2 capítulo 1 de este libro (s/RD 312/2005, modificado por el RD 110/2008)
 (***) Coste energético de fabricación (1 Mj= 0'278 Kwh; 1Kwh= 3'6 Mj)

Tabla II.6: Cuadro comparativo de materiales aislantes para una fachada. (Sanchez-Ostiz, 2011)

Se expresa una tabla de los diferentes aislamientos habituales que puede tener una fachada ventilada, así como sus características principales que pueden ser objeto de elección.

Se podrá utilizar distintos tipos de aislamientos como la fibra de vidrio, poliestireno extrusionado, lana de roca, etc. Sus diferentes características permiten mejorar el aislamiento térmico y acústico del sistema de cerramiento.

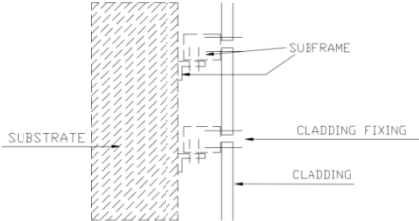
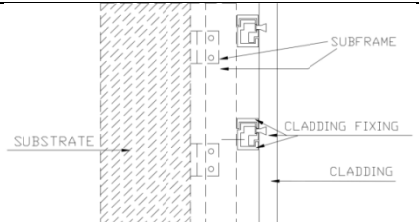
Subestructura

Es la parte del sistema capaz de soportar el revestimiento final de la fachada. Dada la condición de resistencia intrínseca a la función constructiva, los materiales para las subestructuras suelen ser de acero inoxidable porque además garantizan su durabilidad debido a su posición constructiva, evitan la corrosión, se comportan adecuadamente frente al fuego en relación a los otros materiales disponibles y es reciclable. Otros materiales son el aluminio, muy utilizado porque optimiza la sección resistente, es económico y ligero, además de tener alta durabilidad y puede ser también reciclable. Se utiliza el acero galvanizado aunque es el material con peor comportamiento frente a su durabilidad y como consecuencia a su oxidación por lo que quizás será el menos utilizado. Otro material es la madera, material que posee humedad variable y por lo tanto movimientos dimensionales que deberán ser tenidos en cuenta.



Figura II.30: Disposición de aislamiento y subestructura de aluminio y de madera en una fachada ventilada cerámica

La guía europea utilizada para la redacción de documentos de idoneidad europeos DITE (ETAG 034), clasifica este tipo de fachadas según sus métodos de fijación de la subestructura, distinguiéndose 8 tipos distintos de la A a la H y que son representados en la tabla siguiente.

A	Conjunto compuesto por elementos de revestimiento fijados mecánicamente a la subestructura por medio de fijaciones tales como clavos, tornillos, remaches, ...:	 <p>Conjunto tipo A (EOTA, 2011)</p>
B	Revestimiento compuesto de elementos de revestimiento fijadas mecánicamente a la subestructura y anclado por enclavamiento mecánico (por lo menos 4 anclajes):	

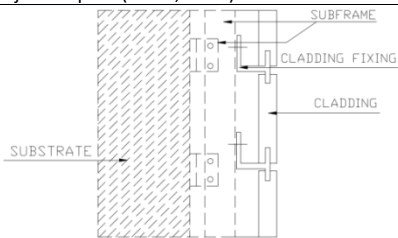
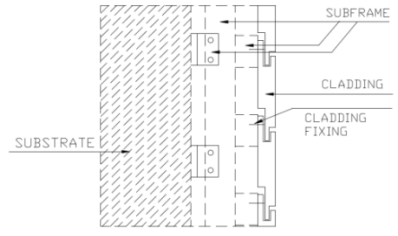
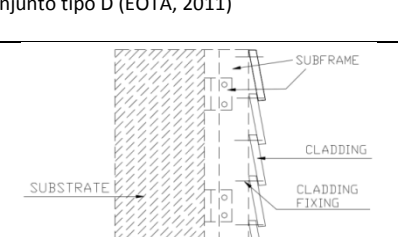
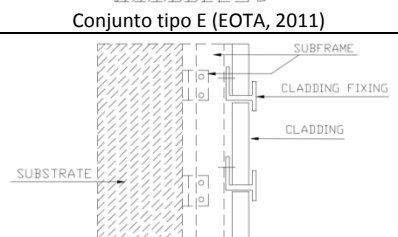
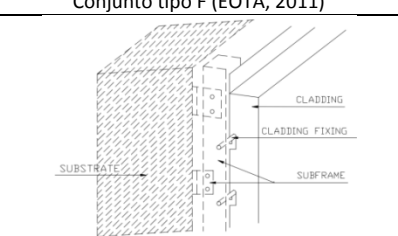
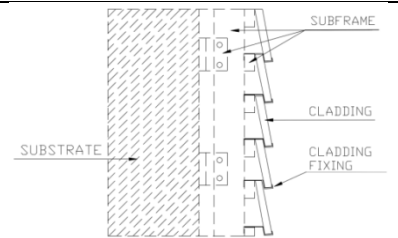
		Conjunto tipo B (EOTA, 2011)
C	Revestimiento compuesto que consiste en elementos de revestimiento instalados en una red horizontal de los carriles de metal o clavos de anclaje (por ejemplo, taco), atornillada a una subestructura vertical.	 <p>Conjunto tipo B (EOTA, 2011)</p>
D	Revestimiento que consta de elementos de revestimiento, integrados con los elementos adyacentes por enclavamiento juntos en la parte superior e inferior con un solapamiento, fijados a la subestructura auxiliar por fijaciones mecánicas colocadas en el borde superior y enmascarada por el borde de los elementos superiores.	 <p>Conjunto tipo C (EOTA, 2011)</p>
E	Revestimiento que consta de elementos fijados a una subestructura auxiliar por fijaciones mecánicas situadas en el borde superior y enmascarados por la parte superior del panel.	 <p>Conjunto tipo D (EOTA, 2011)</p>
F	Revestimiento que consta de elementos fijados mecánicamente a la subestructura auxiliar por lo menos 4 clips metálicos o rieles.	 <p>Conjunto tipo E (EOTA, 2011)</p>
G	Revestimiento compuesto de elementos suspendidos en la subestructura auxiliar.	 <p>Conjunto tipo F (EOTA, 2011)</p>
H	Revestimiento de azulejos soportados	 <p>Conjunto tipo G (EOTA, 2011)</p>
		Conjunto tipo H (EOTA, 2011)

Tabla II.7: Clasificación según sistema de sujeción de las fachadas ventiladas. (EOTA, 2011)

Si bien la subestructura debe tener la función principal de sujeción es un hecho que pudiera ser posible convertirse en un puente térmico. En este sentido (Tanner et al, 1998) en el informe final nº 158740 del Laboratorio Federal Suizo de ensayos de materiales y de

investigación del Departamento de Física de las Construcciones realizó una interesante investigación sobre la subestructura en la fachada ventilada y en concreto centraba la investigación en cuantificar las pérdidas de energía según el tipo de subestructura que está siendo utilizada sin considerar el acabado final. Realizó una toma de datos in situ de cuatro sistemas diferentes: subestructura de madera simple y doble cada 60 cm, subestructura de acero inoxidable y subestructura de aluminio con y sin separador térmico y 14 tipos de ensayos realizados. El factor de la velocidad de aire es tenido también en cuenta. Los datos fueron comparados por los cálculos del programa Trisco.

Los estudios concluyeron que el valor de transmitancia térmica del cerramiento era $U=0,27\text{W/m}^2\text{K}$, un muro de hormigón y un aislamiento de fibra de vidrio. En contraposición con los mismos tipos de materiales el valor de transmitancia térmica se elevó a $U=0,40\text{W/m}^2\text{K}$ cuando se incorporaba unas ménsulas de aluminio atornilladas al muro soporte. Esto supuso un incremento del 48% sobre la transmitancia térmica inicial.

Este estudio demuestra la importancia de los puentes térmicos y sobre todo ya en el proceso de diseño. En el año 2011 realicé un estudio indicativo con los documentos DAU, DITE y DIT existentes en España relativos a la fachada ventilada. Analizados los 32 sistemas de fachada ventilada encontrados, sólo dos de ellos indicaron de forma expresa la necesidad de interponer entre la ménsula y el muro soporte un elemento para la rotura del puente térmico. Además de estas 32 soluciones muchas de ellas tienen como ménsula el material que más conductividad térmica tiene.

Esta situación no es sino más que preocupante, ya que con las nuevas exigencias normativas en relación a un consumo casi nulo del edificio, estos defectos en el diseño se deberían anular urgentemente. Debemos guardar cierta precaución también en conocer verdaderamente lo que está dispuesto en el parque inmobiliario, ya que como limitación no se conoce la repercusión de cada uno de los documentos en su construcción real, aunque lo cierto es que la interposición de un elemento aislante en su construcción, no es más que engorroso para el operario que lo tiene que ejecutar.



Figura II.31: Espaciador térmico de plástico reforzado con fibra de vidrio para rainscreen walls

Empresas fabricantes en otros países, visto el gran problema planteado, han diseñado una solución para poder disponer de un elemento ménsula que con una conductividad térmica muy baja fuese dispuesto para eliminar ese puente térmico, denominado espaciador térmico. Este elemento ha sido diseñado con plástico reforzado con fibra de vidrio.

Cámara de aire

Según el ambiente al que esté orientado la fachada ventilada, la cámara de aire tendrá fundamentalmente dos enfoques diferentes. El primero será evitar la transmisión del calor por conducción en el sistema de cerramiento. Como la cámara tiene la cualidad de estar ventilada también impide que se produzca transmisión de calor por convección hacia el interior al impedir que se caliente el aire. Sin embargo, también protege de la acción de la lluvia, ya que evita que el agua se introduzca en la cámara o si es así, permite teóricamente que se evapore y se extraiga mediante conductos dispuestos a tal efecto. Tiene la función de controlar las condensaciones intersticiales y superficiales que se pudiesen producir. Lógicamente aquí la función del clima es de gran relevancia para este comportamiento.

Las **dimensiones de la cámara de aire** para ser considerada como tal varían según los documentos a los que se haga referencia:

Si analizamos la guía de la European Technical Approval Guidance, ETAG 034 (2011) para la elaboración de los Documentos de Idoneidad Técnica Europeo (DITE) de *Kits for external wall claddings*, parte 1 se considera la cámara de aire como la capa de aire que hay entre el sustrato o aislante térmico y el elemento de revestimiento que está en contacto con el ambiente exterior de modo que permite la difusión del vapor de agua desde el lado interior de la pared. Al mismo tiempo define *fachada ventilada cuando la cámara de aire tiene un espesor mínimo de 20 mm* (pudiendo reducirse a 5-10 mm en puntos localizados de la cámara, dependiendo del revestimiento y la subestructura) y *las aberturas de ventilación mínimas son de 5000 mm² en el arranque y coronación de la fachada*.

La publicación técnica británica *Standard for walls with ventilated rainscreen* del *Centre for Window and Cladding Technology, CWCT* (1998) indica que la cámara de aire tendrá al menos 25mm de espesor.

Si bien las normativas establecen dimensiones mínimas, diversos autores recomiendan 4 o 5 cm de espesor de la cámara para que funcione adecuadamente, aunque las condiciones climáticas de cada lugar, la orientación de la fachada es determinante para este parámetro.

En cuanto al **grado de ventilación de la cámara de aire** para ser designada como tal, los diferentes documentos la clasifican de forma diferente atendiendo a la superficie de aberturas.

En el estándar **ISO 6946:2007**, se define en el apartado 5.3.4 Cámara de aire ventilada

*[...] Una cámara de aire ventilada es aquella en que las aberturas entre la cámara de aire y el ambiente exterior sean iguales a o superiores a: **1.500mm² por metro lineal (en la dirección horizontal) para las cámaras de aire verticales, 1.500mm² por metro cuadrado de superficie para cámaras de aire horizontales***

En España según establece en el CTE define de forma diferente según el documento básico a que haga referencia DB HE-1 o DB HS-1.

En el **CTE** documento básico **DB HS 1**, en su Apéndice A, se define la cámara ventilada como:

[...] espacio de separación en la sección constructiva de una fachada que permite la difusión del vapor de agua a través de aberturas al exterior dispuestas de forma que se garantiza la ventilación cruzada.

Asimismo, en el apartado 2.3.2 de este DB HS1, cuando se describe el nivel de prestación B3 se indica que:

[...] la cámara de aire ventilada debe tener un espesor $\geq 3\text{cm}$ y $\leq 10\text{cm}$, un sistema de recogida y evacuación de agua y aberturas de ventilación con una anchura $> 5\text{mm}$ repartidas al 50% entre la parte superior y la inferior de un paño entre forjados. El área de ventilación efectiva será $\geq 120\text{cm}^2$ por cada 10m^2 de fachada entre forjados.

Sin embargo en el CTE Apéndice E, del documento básico **DB HE1**, se define:

[...] la cámara muy ventilada como el espacio en el que los valores de aberturas exceden: 1.500 mm^2 por metro de longitud contado horizontalmente para cámaras de aire verticales.

El CTE hace una distinción entre una cámara de aire ligeramente ventilada y una muy ventilada, siendo el límite entre una y otra un valor para la superficie de juntas de 1.500mm^2 por ml contado en horizontal para cámaras verticales; y el mismo valor aplicado a los m^2 de superficie para cámaras de aire horizontales. Con una junta de 5 mm estaríamos hablando de una longitud de 300 mm, es decir 30cm. Este valor de aberturas es considerablemente pequeño tanto para un metro lineal de fachada como para un metro cuadrado. Fácilmente la hoja exterior superara este valor. En estos casos, la resistencia térmica de la cámara y la de la hoja exterior se despreciaran en el cálculo de la transmitancia. El CTE indica que, como resistencia superficial exterior se emplee el mismo valor que para la interior.

Pero cuando la cámara esta ventilada, y sobre todo orientada al sur, la cuantificación de la transmitancia resulta mucho más compleja. ¿Cuál es la temperatura de la cámara?, ¿qué volumen de aire circula por unidad de tiempo?, ¿cuánto irradia la hoja exterior hacia el interior? ¿Cómo mejoraría el comportamiento?

Todas estas preguntas son difíciles de contestar y la respuesta varía para cada lugar, diseño y ejecución. Según los investigadores dependerá de muchos factores entre los que se puede nombrar el material de la hoja exterior, del tamaño, longitud y geometría de las juntas, de la anchura de la cámara, de su posible sectorización, etc

Protección exterior

Es inicialmente el elemento más determinante en la fachada, ya que en la actualidad la imagen es muy recurrida en la percepción de los edificios. Sin embargo, tan importante o más son la adecuada resistencia al ambiente exterior, y en particular a las solicitaciones surgidas como a las propias de los esfuerzos y al deterioro.

La norma UNE 41957-1 define el revestimiento de fachada ligero como:

[...] revestimiento discontinuo de una fachada formado por un conjunto de elementos superficiales (normalmente de poco espesor), con un peso menor que 180Kg/m², que precisa de otros elementos para asegurar su estabilidad, constituir el cerramiento, con juntas abiertas, o selladas, que permitan el libre movimiento de sus componentes (que pueden ser paneles, tableros, placas o plaquetas de diferentes materiales) y cuya unión al soporte requiere el empleo de un subsistema de anclajes [...]

Distintas clasificaciones se han desarrollado para definir la fachada ventilada atendiendo al material utilizado como puede ser la piedra natural, hormigón, la cerámica, láminas y placas metálicas, composite, madera, etc.

Nuevamente la guía europea ETAG 034 que clasificaba los tipos de fachadas ventiladas por su subestructura también lo hace por la relación entre este tipo de elementos y los materiales de revestimiento exterior. Se recogen estos tipos en la siguiente tabla.

Familia	Ejemplos de materiales de revestimiento exterior	Ejemplos de materiales de fijación
A	Tableros de madera y derivados, metal, piedra, laminados, fibras de cemento, paneles de madera cemento	Acero galvanizado, acero inoxidable o aluminio para clavos, tornillos o remaches
B	Tableros de resinas con mortero, piedra, cerámica, laminados, paneles de fibra-cemento	Anclajes de acero inoxidable
C	Cemento reforzado con fibras, Tableros de resinas con mortero, piedra, cerámica, laminados, paneles de fibra-cemento	Perfiles de aleaciones de aluminio o acero inoxidable en pasadores
D	Plásticos o Cemento reforzado con fibras	Acero galvanizado. Acero inoxidable o aleaciones de aluminio en forma de tornillos
E	Tableros de madera y derivados, plástico o tableros de madera-cemento	Acero galvanizado, acero inoxidable o aleaciones de aluminio en forma de tornillos
F	Cemento reforzado con fibras, GRC, terracotta o losetas cerámicas	Acero inoxidable
G	Casetes de metal	Acero inoxidable y aleaciones de aluminio en la subestructura
H	Paneles derivados de la madera, hormigón, fibra cemento, aplacados de terracotta	Acero galvanizado, acero inoxidable, cobre o aleaciones de aluminio en forma de tornillos, clavos o soportes.

Tabla II.8: Materiales para el revestimiento de fachadas y sus fijaciones según clasificación ETAG 034 de tipos de fachadas ventiladas. (EOTA, 2011)

El tipo de material es importante, ya que es la primera línea de defensa de la envolvente. Su grado de estanqueidad al agua en climas lluviosos es muy importante pero a la vez su grado de ventilación. Investigadores como Kerby Garden analizaron las seis fuerzas que podrían permitir el paso del agua por las juntas al interior del cerramiento. Este estudio está gráficamente representado en la siguiente figura.

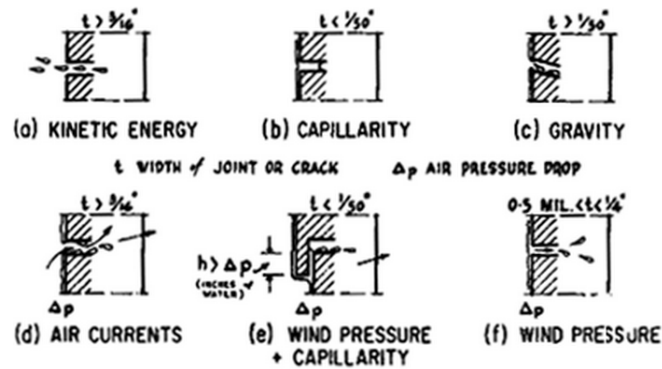


Figura II.32: Fuerzas que producen la penetración de la lluvia al interior de la cámara (Garden, 1963)

En el estudio realizado por (Mas et al, 2011) para mejorar la impermeabilidad de un aplacado de piedra en las fachadas ventiladas, llegaron a la conclusión que para anchos de juntas de 8mm, la tensión superficial y la acción capilar tienen poca importancia. Sin embargo, la gravedad y la energía cinética se manifiestan como las principales fuerzas de ingreso de agua. Por ello, es necesario un correcto diseño de junta.

En este sentido, la norma alemana DIN 4108:3, la orientación y el tipo de corte en la junta para evitar el ingreso de agua. La figura siguiente muestra la sección de la protección exterior.

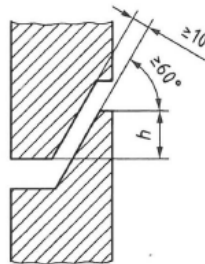


Figura II.33: Sección de junta en el acabado del aplacado exterior según norma DIN 4108-3:2014

Es importante remarcar la importancia del paramento exterior para evitar el ingreso de agua en este tipo de cerramientos, y la necesidad de un diseño, dimensiones, diseño de la junta, elección y tratamiento de material apropiado. Estas afirmaciones son también corroboradas en los estudios de (Bescansa, 2015) y (Bouza, 2015)

Como conclusión final de este subapartado, se puede resumir que la estrategia de la transpirabilidad en un cerramiento debe ser considerada. Hay que tener en cuenta las propiedades higrotérmicas vinculantes de cada capa, así como la posición de los mismos. Es importante también tener la comprensión de las funciones que realiza y que cumple cada parte de la fachada ventilada, en concreto, la piel exterior, la cámara de aire, aislamiento y

hoja interior. Las exigencias prestacionales vendrán dadas por la posición del material en la capa del cerramiento.

Llegados al punto y final del apartado primero del capítulo II, se han recogido ahora los estudios de una serie de investigadores que resumen los parámetros que consideran relevantes para conseguir un óptimo comportamiento en el cerramiento. En concreto, en el ámbito de la fachada ventilada también se han expuesto las variables que se consideran relevantes.

(Giancola E, 2010) definió los principales parámetros que caracterizan térmicamente la envolvente de un edificio y que son fundamentalmente, de caracterización de los materiales. La emitancia de cada una de las superficies, absorptancia de cada material, transmitancia de cada material, factor de forma de cada superficie del cerramiento respecto a cada uno de los objetos de su entorno, la capacidad calorífica de cada material, que está descrita por su calor específico y por su densidad, conductividad térmica de cada una de las capas que forman los cerramientos, dimensiones (espesor y área) de las capas que los componen, coeficiente de transferencia de calor por convección a través del área A de la superficie h conv, posición y dimensiones de grietas y aberturas en la envolvente constructiva. Estos parámetros han sido considerados relevantes dados los ensayos realizados en Almería, con clasificación Köppen Geiger Bsk

En el caso de (Stazi et al, 2014) indica que los parámetros que intervienen en el comportamiento energético de la fachada ventilada son el espesor y la altura de la cámara de ventilación. Factores influenciados con el lugar (radiación solar, viento y exposición) el cual determina el microclima local. El tipo de revestimiento exterior, las características de los materiales los cuales se encuentran adyacentes a la cámara, y el material de la cámara interior. El comportamiento de la cámara de ventilación puede variar de acuerdo con la posición del aislamiento térmico y la masa que tiene inercia.

(Ciampi et al, 2003) los parámetros de mayor intensidad de la radiación solar se correlacionan con el mejor comportamiento energético.

(Nore K, 2009) Se encontró que cuando se analizaba las fluctuaciones del contenido de humedad la mayor correspondencia eran con las variaciones de temperatura, radiación y velocidad del viento y no tanto con las variaciones de precipitación, “wind driven rain” y dirección del viento. En la actualidad en Noruega, las recomendaciones en el diseño de fachada de este tipo son incrementar la profundidad de la cámara de aire de acuerdo con la cantidad de “wind driven rain” de la localización. Este índice no tiene en cuenta el efecto secante del viento.

(Falk et al, 2014) Los resultados muestran que la cámara ventilada ayuda al proceso de secado de las rainscreen walls pero también indica que es altamente influenciados por los parámetros: condiciones climáticas exteriores, tamaño y posición física de las concentraciones de humedad, geometría y flujos de la cámara y propiedades hídricas de cada capa de los materiales que conforman el cerramiento.

(Russill, 2008) En el capítulo de factores que influyen el comportamiento del aislamiento térmico, indica una serie de factores como “el espesor de la cámara de aire, la robustez de los materiales de aislamiento, el uso de barreras de aire y vapor o capas de control de humedad...”

El valor de U de una cámara aislada de un muro puede ser influenciado por diferentes factores: 1) el espesor del aislamiento, la conductividad térmica del aislamiento (que depende del material usado, su densidad y las condiciones medioambientales); 2) la presencia de huecos o vacíos de aire en el aislamiento y en la distribución de éste; 3) la variación de compacidad del aislamiento, material no homogéneo; 4) movimientos de aire alrededor del aislamiento (el cual puede ser con probabilidad influenciado por convección, condiciones del viento externo y la hermeticidad de otras partes del muro; 5) puentes térmicos del aislamiento debido a irregularidades del muro, salientes del mortero u otras obstrucciones dentro de la cámara 5) el grado de densidad de los ladrillos de hormigón que forman el muro interior

Algunos de estos factores pueden influir otros: 1) la condición del aislante, incluida la presencia de humedad y en el caso de los aislamientos con bolas la composición del aglutinante; 2) el espaciamiento de los huecos hecho por los instaladores del aislamiento en la cámara; 3) el uso de la maquinaria para inyectar el aislamiento en la cámara y la precisión en la calibración de la maquinaria; 4) la condición y limpieza de la cámara y presencia de obstrucciones antes de la instalación del aislamiento en la cámara y 5) la precisión en la estimación de la cantidad de material de aislamiento necesaria

Como se observan son todas variables, que de alguna forma han sido referenciadas anteriormente en el discurso y que pueden considerarse incorporadas en los tres ámbitos en los que el discurso de desarrolló, el ambiental, la caracterización de los materiales y el constructivo-arquitectónico.

Para finalizar se ha extraído una tabla de un estudio de (Mao, 2008) en el que recoge multitud de parámetros de los cuales ya se han hablado previamente y que también pueden ser clasificados en los tres ámbitos que se han discutido.

Esta tabla ha sido adaptada y se expone a continuación con las categorías y parámetros que considera influyen en el secado, en el mojado o indistintamente. Para distinguir los ámbitos, se ha dado un color diferente.

Tipo de variable	Categorías	Proceso de mojado	Proceso de secado
Caracterización de materiales	Mecanismos de transporte	Vapor de agua Difusión de vapor Transporte de vapor por el aire	
		Agua líquida Penetración de lluvia Ascenso capilar	Agua líquida Drenaje Difusión de agua Acción capilar
	Propiedades de los materiales	Propiedades de permeancia al vapor al agua al aire Propiedades térmicas para Conducción Convección Radiación Difusividad del agua Fallo de humedad	
		Propiedad de retención (sorpción)	Propiedad de retención (desorción)
Ambientales	Caracterización de las cargas	Ambiente exterior T y HR aire WDR Índice de humedad Ambiente interior T y HR aire	
	Influencias del clima	Tipos de clima y clasificaciones Respuesta de la humedad de un muro bajo diferentes tipos de climas	
Constructivo-arquitectónicas	Caracterización de las respuestas del cerramiento	Comportamiento de la humedad Perfiles de contenido de humedad Nacimiento de algas y hongos	
		Método de evaluación Resistencia a la penetración	Método de evaluación Ratio de secado Capacidad de secado
	Funciones de los componentes del cerramiento	Funciones y efectividad de Barrera de vapor Revestimiento Cámara de aire Barrera de aire Barrera de resistencia a la intemperie Protecciones	
	Influencia de las diferentes configuraciones del cerramiento	Influencias de diferentes Revestimientos Cámaras de aire (ventilada, no ventilada,...) Materiales de protección Barreras de vapor	
	Aplicación en el diseño	Método de diseño Criterio de diseño Diseño de estados límite	

Tabla II.9: Variables higrotérmicas en el cerramiento (Adaptado de Mao, 2008)

De toda esta revisión realizada, **se puede resumir que se ha cumplido el objetivo específico de recopilar bibliográficamente las variables que influyen.** Estas variables han sido múltiples pero pueden ser clasificadas atendiendo a la estructura inicial redactada, ámbito ambiental, de características de los materiales y constructivo-arquitectónicas.

. La humedad en el comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada tiene gran peso en todos los ámbitos. Son reiterados los discursos de influencia de los parámetros ambientales del Wind Driven Rain y humedad relativa además de la temperatura. Con respecto a las propiedades de caracterización de materiales relativos es la absorción de agua y de permeabilidad al vapor de agua, los parámetros que se vinculan a los procesos de mojado y secado de los materiales.

. El ámbito constructivo-arquitectónico, es la posición de los materiales (en concreto barrera para vapor y/o impermeable y aislamiento) y de la cámara de aire que es influenciada por la humedad. En el ámbito térmico, significativamente es la conductividad térmica el parámetro más relevante para determinar el óptimo comportamiento.

Resta ahora proceder al análisis del contexto normativo para observar si los parámetros son tenidos en cuenta y en qué medida estos parámetros son utilizados. Esta temática se desarrollará en el siguiente apartado.

II.2 MARCO NORMATIVO NACIONAL E INTERNACIONAL PARA EL DISEÑO

El siguiente apartado del capítulo II estado del arte tiene como objetivo principal analizar crítica y comparativamente normas nacionales e internacionales así como definir las prestaciones higrotérmicas de la fachada ventilada.

Para dar respuesta a este objetivo, este apartado se estructura principalmente en dos partes. En la primera parte se analizan críticamente los documentos del Código Técnico de Edificación. Inicialmente el Documento Básico de Habitabilidad Salubridad: protección frente a la humedad DB HS-1:2013 y finalmente el Documento Básico de Habitabilidad Ahorro de Energía: limitación de la demanda de energía DB HE-1:2013.

La segunda parte se hace un resumen de las características a nivel hídrico y térmico de la guía ETAG 034 para las fachadas ventiladas. También se hace un pequeño recorrido por los Códigos de Edificación y particularidades de los países de Gran Bretaña, Canadá y EEUU. Finalmente el apartado concluye con un resumen general de todo lo observado sobre el objetivo a cumplir.

II.2.1 MARCO NACIONAL

En el marco normativo nacional, desde el año 2006 es de aplicación el **Código Técnico de la Edificación CTE** y los documentos básicos DB que forman parte de éste. El **Documento Básico de Habitabilidad Salubridad** (CTE DB HS-1:2013) es de aplicación para la protección frente a la penetración de agua o humedad al interior del edificio. Su articulado 13.1 expone el ámbito de aplicación.

*[...] Se limitará el riesgo previsible de **presencia inadecuada de agua o humedad** en el interior de los edificios y en sus cerramientos como **consecuencia del agua procedente de precipitaciones atmosféricas, de escorrentías, del terreno o de condensaciones**, disponiendo medios que impidan su penetración o, en su caso permitan su evacuación sin producción de daños.*

En el caso de la comprobación de la limitación de humedades de condensaciones superficiales e intersticiales, se indica que se realizará según lo establecido a otro documento básico de Habitabilidad de Energía DB HE-1: limitación de la demanda energética. Esta sección remite al Documento de Apoyo (DA DB-HE/2) basada en la norma UNE EN ISO 13788 *Características higrotérmicas de los elementos y componentes de edificación. Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial. Métodos de cálculo.*

Para el caso de limitación de las condensaciones, *tanto en edificaciones nuevas como en edificaciones existentes, en el caso de que se produzcan condensaciones intersticiales en la envolvente térmica del edificio, estas serán tales que no produzcan una merma significativa en sus prestaciones térmicas o supongan un riesgo de degradación o pérdida de su vida útil. Además, **la máxima condensación acumulada en cada periodo anual no será superior a la cantidad de evaporación posible en el mismo periodo.***

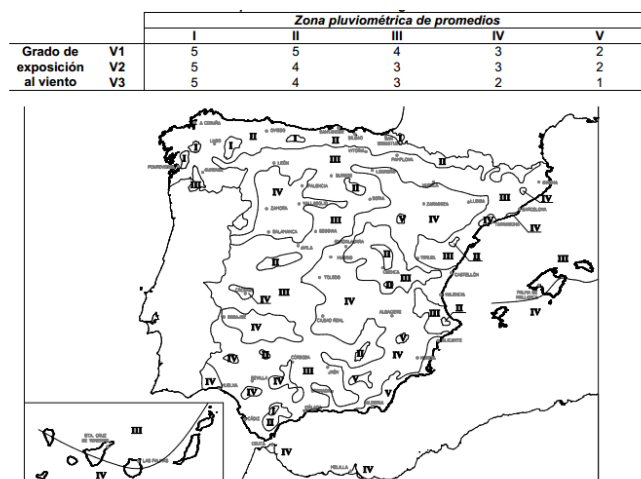


Figura II.34: Tabla 2.5 Grado de impermeabilidad mínimo exigido a las fachadas y Figura 2.4 zonas pluviométricas de promedios en función del índice de promedio anual. (C.T.E. DB HS-1: 2013)

El documento DB HS-1:2013 especifica el procedimiento a seguir para garantizar la prestación. Se define un **grado de impermeabilidad** a través de datos del clima y se extrae de la tabla 2.5, incorporada como figura II.34, que es función de la zona pluviométrica de promedios y del grado de exposición al viento.

A su vez estos datos son obtenidos de:

- a) la **zona pluviométrica de promedios** se obtiene de la figura 2.4;
- b) el **grado de exposición al viento** se obtiene en la tabla 2.6 en función de la altura de coronación del edificio sobre el terreno, de la zona eólica correspondiente al punto de ubicación, obtenida de la figura 2.5, y de la clase del entorno en el que está situado el edificio que será E0 cuando se trate de un terreno tipo I, II o III y E1 en los demás casos, según la clasificación establecida en el DB SE.

		Clase del entorno del edificio					
		E1			E0		
		Zona eólica			Zona eólica		
		A	B	C	A	B	C
Altura del edificio en m	≤15	V3	V3	V3	V2	V2	V2
	16 - 40	V3	V2	V2	V2	V2	V1
	41 - 100 ⁽¹⁾	V2	V2	V2	V1	V1	V1

⁽¹⁾ Para edificios de más de 100 m de altura y para aquellos que están próximos a un desnivel muy pronunciado, el grado de exposición al viento debe ser estudiado según lo dispuesto en el DB-SE-AE.



Figura 2.5 Zonas eólicas

Figura II.35: Tabla 2.6 Grado de exposición al viento y figura 2.5 de zonas eólicas. (C.T.E. DB-HS-1, 2013)

En resumen, el CTE, para definir el grado de impermeabilidad, utiliza los parámetros de pluviosidad y grado de exposición al viento. Sin embargo, como se verá posteriormente existen otros parámetros que cuantifican más adecuadamente el riesgo hídrico del cerramiento. Uno de ellos es el WDR, la lluvia dirigida por el viento o lluvia batiente. Este parámetro toma en consideración la lluvia horizontal que en combinación con el viento bate sobre una superficie vertical.

En este sentido (Perez-Bella et al, 2013) define un nuevo índice combinación de dos parámetros existentes **WDR (lluvia dirigida por viento)** y **DRWP (presión de viento que arrasta lluvia)**. Este nuevo índice denominado **Risk Index of Water Penetration (RIWP) índice de riesgo de penetración de agua** sirve para caracterizar adecuadamente el riesgo de la penetración del agua en los cerramientos en cada lugar o región. Estos autores elaboraron unos mapas de isopletras del índice de lluvia batiente y de lluvia batiente y presión de viento.

El índice de riesgo propuesto por Pérez Bella supone un parámetro objetivo de posible clasificación de clima atendiendo al riesgo de penetración de agua. Las áreas de diferentes radios exponen los valores de riesgo. Los puntos más alejados, como el caso de Santiago de Compostela o Izaña son los que poseen un riesgo más severo. Se ve representado en la figura II.36.

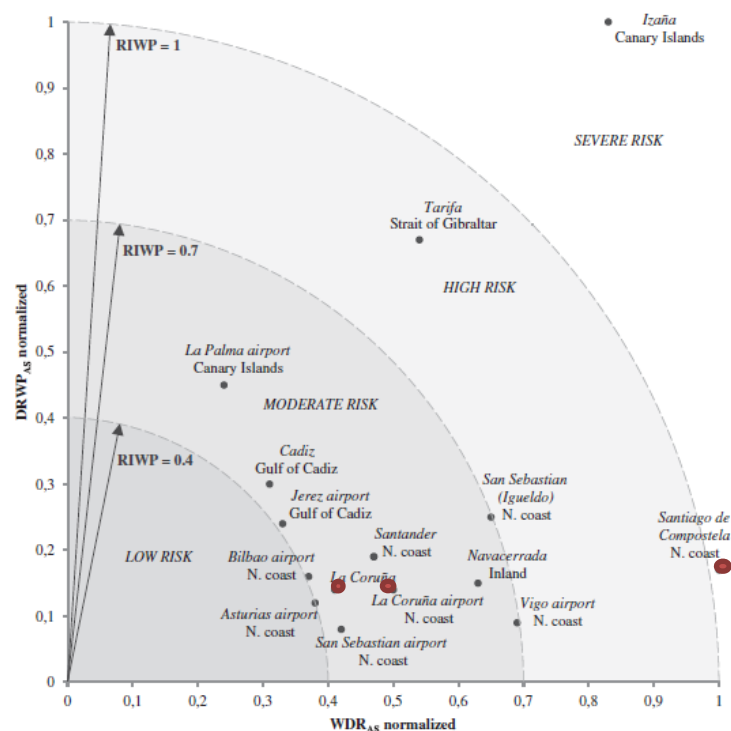


Figura II.36: Esquema de clasificación del índice de riesgo de penetración de agua en las edificaciones atendiendo al WDR y WRWP (Perez-Bella et al, 2013)

Con todos los datos climáticos obtenidos de las diferentes estaciones de Galicia, este investigador realizó un mapa donde localiza el índice de riesgo a la penetración del agua. El mayor riesgo es el indicado por la oscuridad de la mancha. En la ciudad de A Coruña no se observa los riesgos más elevados. Es en la ría de Noia, el área Santiago de Compostela o Cedeira, donde se encuentra los valores más desfavorables.

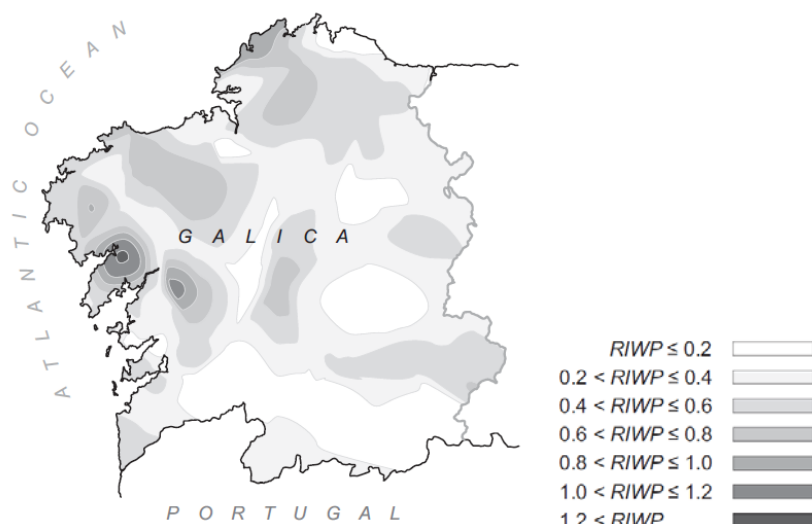


Figura II.37: Índice del riesgo de penetración del agua en las fachadas de los edificios (RIWP) en Galicia (Pérez-Bella et al, 2014)

Con los parámetros antes indicados del CTE, se define el grado de impermeabilidad como:

*[...] **Número indicador de la resistencia al paso del agua** característica de una solución constructiva definido de tal manera que crece al crecer dicha resistencia y, en consecuencia, cuanto mayor sea la sollicitación de humedad mayor debe ser el grado de impermeabilidad de dicha solución para alcanzar el mismo resultado.*

Si bien el grado de impermeabilidad es un número del 1 al 5, las condiciones que deberán poseer las soluciones de los sistemas constructivos de fachada según el grado de impermeabilidad exigido son indicadas mediante códigos establecidos en la siguiente tabla 2.7:

Grado de		Con revestimiento exterior		Sin revestimiento exterior			
		R1+C1 ⁽¹⁾		C1 ⁽¹⁾ +J1+N1			
≤1		R1+C1 ⁽¹⁾		C1 ⁽¹⁾ +J1+N1			
≤2				B1+C1+J1+N1	C2+H1+J1+N1	C2+J2+N2	C1 ⁽¹⁾ +H1+J2+N2
≤3		R1+B1+C1	R1+C2	B2+C1+J1+N1	B1+C2+H1+J1+N1	B1+C2+J2+N2	B1+C1+H1+J2+N2
≤4		R1+B2+C1	R1+B1+C2	R2+C1 ⁽¹⁾	B2+C2+H1+J1+N1	B2+C2+J2+N2	B2+C1+H1+J2+N2
≤5		R3+C1	B3+C1	R1+B2+C2	R2+B1+C1	B3+C1	

⁽¹⁾ Cuando la fachada sea de una sola hoja, debe utilizarse C2.

Tabla II.10: Tabla 2.7. Condiciones de las soluciones de fachada, (C.T.E. DB HS-1, 2013)

El significado de los códigos son R) Resistencia a la filtración del revestimiento exterior; B) Resistencia a la filtración de la barrera contra la penetración de agua; C) Composición de la hoja principal; H) Higroscopicidad del material componente de la hoja principal; J) Resistencia a la filtración de las juntas entre las piezas que componen la hoja principal y N) Resistencia a la filtración del revestimiento intermedio en la cara interior de la hoja principal

A continuación se muestra una tabla resumida con la explicación de las condiciones posibles de soluciones de fachada que pueden darse tanto según lo establecido en el DB HS-1:2013 como en el Catálogo de Elementos Constructivos.

Parámetro	Iniciales y valor	Unidades	Norma
Prestaciones exigidas:			
Grado de impermeabilidad	GI de 1 a 5	adimensional ---	Obtenido CTE-HS-1 de tablas: (2.4) Zona pluviométrica y exposición al viento (que depende a su vez (2.6) de la zona eólica, altura edificio)
Condiciones de las soluciones de fachada:			
Resistencia a la filtración del revestimiento exterior (discontinuo)	R de 1 a 3	---	R1 -piezas menores de 300 mm de lado -fijación al soporte suficiente para garantizar su estabilidad -disposición en la cara exterior de la hoja principal de un enfoscado de mortero -adaptación a los movimientos del soporte.
			R2 -Revestimientos rígidos fijados mecánicamente dispuestos de tal manera que tengan las mismas características establecidas para los discontinuos de R1, salvo la del tamaño de las piezas
			R3 -fijados mecánicamente de alguno de los siguientes elementos dispuestos de tal manera que tengan las mismas características establecidas para los discontinuos de R1, salvo la del tamaño de las piezas: - escamas: elementos manufacturados de pequeñas dimensiones (pizarra, piezas de fibrocemento, madera, productos de barro); - lamas: elementos que tienen una dimensión pequeña y la otra grande (lamas de madera, metal); - placas: elementos de grandes dimensiones (fibrocemento, metal); - sistemas derivados: sistemas formados por cualquiera de los elementos discontinuos anteriores y un aislamiento térmico.
Resistencia a la filtración de la barrera contra la penetración de agua	B3 (muy alta)	--	B3 -una cámara de aire ventilada y un aislante no hidrófilo de las siguientes características: - la cámara debe disponerse por el lado exterior del aislante; -debe disponerse en la parte inferior de la cámara y cuando ésta quede interrumpida, un sistema de recogida y evacuación del agua filtrada a la misma (véase el apartado 2.3.3.5); - el espesor de la cámara debe estar comprendido entre 3 y 10 cm; - deben disponerse aberturas de ventilación cuya área efectiva total sea como mínimo igual a 120 cm ² por cada 10 m ² de paño de fachada entre forjados repartidas al 50% entre la parte superior y la inferior. Pueden utilizarse como aberturas rejillas, llagas desprovistas de mortero, juntas abiertas

			<p>en los revestimientos discontinuos que tengan una anchura mayor que 5 mm u otra solución que produzca el mismo efecto.</p> <p>Revestimiento continuo intermedio en la cara interior de la hoja principal, de las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> -estanquidad al agua suficiente para que el agua de filtración no entre en contacto con la hoja del cerramiento dispuesta inmediatamente por el interior del mismo; - adherencia al soporte suficiente para garantizar su estabilidad; - permeabilidad suficiente al vapor para evitar su deterioro como consecuencia de una acumulación de vapor entre él y la hoja principal; - adaptación a los movimientos del soporte y comportamiento muy bueno frente a la fisuración, de forma que no se fisure debido a los esfuerzos mecánicos producidos por el movimiento de la estructura, por los esfuerzos térmicos relacionados con el clima y con la alternancia día-noche, ni por la retracción propia del material constituyente del mismo - estabilidad frente a los ataques físicos, químicos y biológicos que evite la degradación de su masa.
Composición de la hoja principal	C1 y 2	---	<p>C1 Debe utilizarse al menos una hoja principal de espesor medio. Se considera como tal una fábrica cogida con mortero de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ½ pie de ladrillo cerámico, que debe ser perforado o macizo cuando no exista revestimiento exterior o cuando exista un revestimiento exterior discontinuo o un aislante exterior fijados mecánicamente - 12 cm de bloque cerámico, bloque de hormigón o piedra natural. <p>C2 Debe utilizarse una hoja principal de espesor alto. Se considera como tal una fábrica cogida con mortero de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 pie de ladrillo cerámico, que debe ser perforado o macizo cuando no exista revestimiento exterior o cuando exista un revestimiento exterior discontinuo o un aislante exterior fijados mecánicamente; - 24 cm de bloque cerámico, bloque de hormigón o piedra natural.
B3' CEC			También puede considerarse equivalente a B3 una cámara de aire ventilada análoga a la anterior en la que el elemento interior de cierre de la cámara no se degrade por la humedad.
R3' CEC			También puede considerarse equivalente a R3 un sistema de paneles

			prefabricados con juntas estancas.
C1' CEC			<p>También puede considerarse equivalente a C1 una fachada formada por paneles prefabricados de hormigón o un muro de hormigón in situ. También puede considerarse equivalente a C1 un elemento ligero de cerramiento con las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Compatibilidad de sus movimientos, debidos a las acciones e influencias previsibles, con el resto de los componentes de la solución; - Permeabilidad al agua y al aire que proporcione una suficiente estanquidad.

Tabla II.11: Condiciones del sistema constructivo de fachada. (Información extraída del C.T.E. y Catálogo de Elementos Constructivos C.E.C.)

Es con la suma de estos códigos, o prestaciones exigidas, con las que podremos combinar las distintas posibilidades de diseño para alcanzar el grado de impermeabilidad exigido. No se observa cuantificación alguna de parámetros.

Si se analiza la fachada ventilada se observa que la condición B3 (la única establecida para usar cámaras ventiladas) es una solución para un Grado de Impermeabilidad definido en la norma como 5 de la tabla 2.7 sobre las condiciones de las soluciones de fachada. La opción codificada de fachada ventilada sería **B3+C1**.

También puede buscarse la solución constructiva de fachada ventilada en el recurso de aplicación del Código Técnico de la Edificación, **Catálogo de elementos constructivos versión marzo 2010 y versión octubre 2011 (aplicación on-line)** y en concreto el grado de impermeabilidad para los distintos diseños.

Cuando se observan las fichas del catálogo, y en la parte inferior de la definición del elemento constructivo, aparece una aclaración en los términos alternativos de considerar una fachada con GI 5:

“(4) Puede considerarse que una fachada tiene GI 5 si, para la presión de diseño en función de la altura del edificio, exposición y zona eólica, es estanca al agua según los ensayos descritos o referenciados en las siguientes normas:

a) Con carácter general, procedimiento A de UNE-EN 12865:2002 "Comportamiento higrotérmico de componentes y elementos de edificación. Determinación de la resistencia al agua de lluvia de muros exteriores bajo impulsos de presión de aire"

b) En caso de fachadas ligeras, UNE-EN 12154:2000 "Fachadas ligeras. Estanquidad al agua. Requisitos y clasificación", o análogamente UNE-EN 13051:2001 "Fachadas ligeras. Estanquidad al agua. Ensayo in situ".

También puede considerarse que una fachada tiene GI 5 si dispone, cerrando la cámara por el interior, de una barrera resistente a la penetración al agua clase W1 y permeable al vapor de agua, que cumpla con UNE-EN 13859-2: 2006 + A1:2009 "Láminas flexibles

para impermeabilización. Definiciones y características de las láminas auxiliares. Parte 2: Láminas auxiliares para muros”

“Puede considerarse que una fachada tiene GI 4 si no se producen fugas, según los ensayos descritos en las normas anteriores, para presiones inferiores pero no menores a 0,25 veces la de diseño y a 300 Pa. En este caso, el sistema o las hojas interiores no deben presentar daños ante las posibles pérdidas de estanquidad puntuales para presiones mayores a éstas.” (..) (Catálogo de Elementos Constructivos, 2010)

Como se ha recogido, para la clasificación del Grado de Impermeabilidad (GI) 5, el catálogo de elementos constructivos establece que se puede obtener mediante un ensayo establecido en la norma UNE EN 12865:2001. En ella se somete a la carga de lluvia total de 2 l/m² min y con una presión de viento simultánea creciente a un cerramiento vertical de dimensiones 1,2 x 2,4 m. Si al finalizar el ensayo el cerramiento es estanco, se consideraría GI 5, o de otros ensayos dependiendo del tipo de fachada. Sin embargo, no hay referencia alguna al clima, la orientación, altura o entorno variable al cual estará sometida una fachada.

A pesar de haber sido definido el grado de impermeabilidad como una característica de una solución constructiva, en el C.T.E. DB HS-1:2013, la obtención del Grado de Impermeabilidad (GI) se ha deducido del clima, con las tablas que relacionan la racha de viento máxima con la precipitación media anual.

Para demostrar lo dicho (Pérez Bella, 2012) hace una comparación del valor del grado de impermeabilidad en los dos documentos, el DB HS-1:2013 y en el Catálogo de Elementos Constructivos. Se observó la no correspondencia entre valores de GI según el documento que se adopte. Esto se justifica en su estudio indicando que existe una inadecuada estimación de la sollicitación establecida por el CTE DB-HS-1:2013, y que en ningún caso es asimilable a las condiciones del ensayo.

Siguiendo este argumento y si se hace la búsqueda para la solución particular constructiva de la fachada ventilada de granito en el Catálogo de elementos constructivos, se define expresamente cómo se consigue la impermeabilización con aislante exterior:

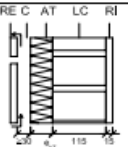
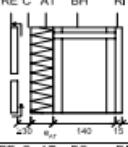
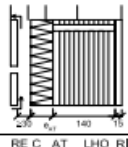
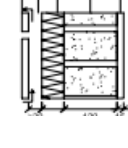
“La impermeabilidad la garantiza una cámara ventilada, hacia el interior se dispone el aislamiento, y después el soporte. Incluye soluciones como las hojas interiores pesadas o ligeras revestidas con aislamiento y con piezas exteriores colgadas de materiales diversos”

Si se analiza el Catálogo de elementos constructivos, para un sistema de cerramiento de una fachada ventilada se observa que son clasificados con GI variables aunque se hable inicialmente de GI 5.

Extrayendo la información del DB HS-1:2013 de las condiciones de las soluciones de la fachada y las del catálogo de elementos constructivos, se define el GI = 5, indicando que se consigue con B3 + C1. Podríamos deducir del Catálogo de Elementos Constructivos que también sería posible las condiciones B'3 + C'1, ya que B3 es equivalente a B'3 y C1 es equivalente a C'1

Se observa que en las tablas de las soluciones constructivas figura una fachada ligera con cámara de aire ventilada su GI 3 y no GI 5 como se especificaba anteriormente.

A partir de aquí hay que hacer una reflexión. El mayor problema expuesto hasta el momento, que ha recogido someramente Pérez Bella, y que da lugar a confusión es que la norma, por una parte, define el riesgo ambiental con la velocidad de viento máxima (sin dirección) y precipitación promedio y la denomina Grado de Impermeabilidad (GI). Sin embargo, si se va al Catálogo de Elementos Constructivos enuncia que un resultado de ensayo de un sistema constructivo de fachada es clasificado con un GI.

FACHADA Hoja principal de fábrica con revestimiento discontinuo							
CON CÁMARA DE AIRE VENTILADA							
Aislamiento por el exterior							
RE revestimiento exterior discontinuo C cámara de aire ventilada ⁽⁷⁾ AT aislante no hidrófilo HP hoja principal LC fábrica de ladrillo cerámico BH fábrica de bloque de hormigón ⁽⁸⁾ BC fábrica de bloque cerámico LHO fábrica de ladrillo perforado de hormigón ⁽⁸⁾ BP fábrica de bloque de picón ⁽⁸⁾ RI revestimiento interior formado por un enlucido, un enfoscado o un alicatado							
Código	Sección	Datos entrada		HS	HE ⁽¹⁾ U (W/m ² K)	HR ⁽²⁾	
		RE	GI			R _A (dBA)	m (kg/m ²)
F 8.1		R2	4	1/(0,47+R _{AT})	42 [43]	39 [40]	156 [168]
		R3 o B3	5				
F 8.2		R2	4	1/(0,48+R _{AT}) ⁽³⁾ 1/(0,97+R _{AT}) ⁽⁴⁾	44 ⁽³⁾ 41 ⁽⁴⁾	41 ⁽³⁾ 38 ⁽⁴⁾	205 ⁽³⁾ 177 ⁽⁴⁾
		R3 o B3	5				
F 8.3		R2	4	1/(0,61+R _{AT})	42 [44]	39 [41]	143 [167]
		R3 o B3	5				
F8.4		R2	4	1/(0,40+R _{AT}) ⁽³⁾ 1/(0,60+R _{AT}) ⁽⁴⁾	44 ⁽³⁾ 42 ⁽⁴⁾	41 ⁽³⁾ 39 ⁽⁴⁾	200 ⁽³⁾ 179 ⁽⁴⁾
		R3 o B3	5				

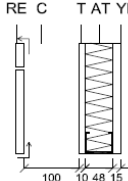
FACHADA LIGERA							
CON CÁMARA DE AIRE VENTILADA							
RE revestimiento exterior discontinuo fijado mecánicamente C cámara de aire ventilada ⁽⁶⁾ AT aislante HI hoja interior T tablero o panel impermeable, por ejemplo, tablero con base de cemento Ci cámara interior no ventilada YL placa de yeso laminado							
Código	Sección	Datos entrada		HS	HE ⁽¹⁾ U (W/m ² K)	HR ⁽²⁾	
		RE	HI			R _A (dBA)	m (kg/m ²)
F.10.1 ⁽⁷⁾		B3'	C1'	3	1/(0,36+R _{AT})	43 ⁽²⁾	48 ⁽²⁾
						48 ⁽³⁾	56 ⁽³⁾

Tabla II.12: Ficha 4.2.8 Fabrica con revestimiento discontinuo, con cámara de aire ventilada, aislamiento por el exterior y ficha 4.2.10 Fachada ligera ventilada. (Catálogo de Elementos Constructivos, 2010)

La normativa ha de diferenciar el riesgo ambiental, las características y solicitaciones hídricas en este caso al que una fachada puede estar sometida en un clima particular. Por otra parte debe ser definido un conjunto de condiciones o características hídricas que el sistema constructivo tiene y que es capaz de soportar en tiempo, pudieran ser cuantificables a nivel de ensayo en conjunto (estanqueidad al agua, higroscopicidad, permeabilidad al agua y al vapor de agua o drenaje) y que puedan correlacionar con el riesgo ambiental definido. Está claro que $GI_{\text{riesgo ambiental}}$ no puede ser igual a GI_{ensayo} . Habrá que definir conceptos en cada parte.

Se hace, pues, necesario separar el concepto de riesgo hídrico ambiental del concepto de impermeabilidad o resistencia del cerramiento al paso del agua, tal y como lo hacen las normas de otros países.

En esta línea se analizan ahora las propiedades hídricas del sistema constructivo. Si bien en la norma se define conceptos con evaluación cualitativa, se ha detectado la dificultad de correlacionar la definición de ese concepto con el parámetro cuantificable. De la lectura de la norma, se ha realizado una tabla, abajo expuesta, que pone en relación el concepto con el parámetro cuantificable que lo define y las normas de ensayo.

Definición en la normativa C.T.E.	Parámetro que lo define	Si hay norma que lo ensaya	Unidades
Estanqueidad al agua "suficiente"	(A) Absorción de agua por capilaridad (producto exterior)	Piedra natural UNE-EN 1925:2005 Mortero endurecido UNE-EN 1015-18:2003 Ladrillo	$\text{Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$
(**) "Aislante hidrófilo" no	(WS) succión o absorción de agua a corto plazo por inmersión parcial menor que 1 kg/m^2 según ensayo UNE-EN 1609:2013	Absorción de agua a corto plazo UNE-EN 1609:2013	Kg/m^2
	(WL) o una absorción de agua a largo plazo por inmersión total menor que el 5% según ensayo UNE-EN 12087:2013	Absorción de agua a largo plazo UNE-EN 12087:2013	Kg/m^2
	(W) (Masa de agua absorbida) bajo presión de viento simultánea (Pa) (elementos de la edificación)	(***) UNE-EN 12865:2002 "Comportamiento higrotérmico de componentes y elementos de edificación. Determinación de la resistencia al agua de lluvia de muros exteriores bajo impulsos de presión de aire" Proc A	Agua rociada $\text{l/m}^2 \cdot \text{min}$ Masa de agua absorbida Kg/m^2

		UNE-EN 12154:2000 Fachadas ligeras. Estanqueidad al agua. Requisitos y clasificación o análogamente UNE-EN 13051:2001 Fachadas ligeras. Estanqueidad al agua. Ensayo in situ.	
Permeabilidad al vapor “suficiente”	δ_p Permeabilidad al vapor de agua	Piedra natural UNE-EN 12524 (tabulado) o 12572:2001 (ensayo)	Kg/(m.s.Pa)
		Mortero endurecido UNE-EN 1015-19	
		Ladrillo	
---	W_p Permeancia al vapor de agua		Kg/(m ² .s.Pa)
---	μ Factor de Resistencia a la difusión del vapor de agua (relación entre la permeabilidad del aire y del material a ensayar)		adimensional
---	S_d Espesor de capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua		m
(*) “Higroscopicidad del material componente de la hoja principal”	(succión) Tasa de absorción de agua inicial		Kg/m ² .min

(*) Prestación no pedida en el caso de fachada ventilada

(**) El C.T.E. DB HS-1 exige en el caso de fachada ventilada que el aislante alcance la clasificación de “no hidrófilo” (requerimiento B3) equivalente a menos de 1kg/m² de absorción de agua en inmersión parcial durante 24 horas (clasificación WS en el marcado CE de los productos de lana de vidrio). WL(P) símbolo del nivel declarado de absorción de agua a largo plazo por inmersión parcial. WS símbolo del nivel declarado de absorción de agua a corto plazo

(***) Se ha considerado en esta tabla ya que se entiende como característica del sistema constructivo vinculante en su elección.

Tabla II.13: Parámetros cuantificables de las prestaciones exigidas en el C.T.E.

Se ve claramente necesario definir con los parámetros de la tabla un método objetivo y cuantificable de la sollicitación hídrica para las fachadas, es decir, un nuevo procedimiento para vincular los parámetros ambientales, que se verán cuáles podrían ser los más adecuados con unos rangos determinados de propiedades hídricas del material y del conjunto. Este enfoque objetivo, a pesar de sus limitaciones, existe para la verificación en el caso de las

condensaciones intersticiales y superficiales, tal y como lo recoge la sección DB HE-1:2013 del C.T.E.

En la actualidad, para las condiciones térmicas es de aplicación el Documento Básico de Ahorro de Energía HE 1 “Limitación de la demanda de energía” del Código Técnico de la Edificación. **CTE DB HE 1:2013** establece qué prestaciones térmicas de la envolvente deberán cumplirse dentro de unos límites y característicos de cada lugar y del régimen de verano o invierno. Define dos procedimientos para poder llegar a cumplir las prestaciones, una opción simplificada y una opción general, que deberá ser calculada en el software LIDER.

El Código caracteriza por partes de la envolvente y en particular a los cerramientos verticales. Uno de los parámetros característicos a cumplir es el valor de la transmitancia térmica o valor U. Los valores en toda la envolvente han sido definidos últimamente en el año 2013, como consecuencia de dar respuesta a la transposición de la Directiva europea 2010/31/UE relativa a la *eficiencia energética en los edificios*, donde exigía a los países miembros establecer unas condiciones que garanticen el consumo de energía casi nulo para las edificaciones.

Tabla E.1. Transmitancia del elemento [W/m² K]

Transmitancia del elemento [W/m ² K]	Zona Climática					
	α	A	B	C	D	E
U_M	0.94	0.50	0.38	0.29	0.27	0.25
U_S	0.53	0.53	0.46	0.36	0.34	0.31
U_C	0.50	0.47	0.33	0.23	0.22	0.19

U_M : Transmitancia térmica de muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno

U_S : Transmitancia térmica de suelos (forjados en contacto con el aire exterior)

U_C : Transmitancia térmica de cubiertas

Tabla II.14: Parámetros característicos de la envolvente térmica. Valores orientativos. (CTE DB HE 1 Apéndice E)

Para introducirse en las tablas, el Código hace una clasificación climática definiendo cinco zonas identificadas como zonas climáticas de invierno con una letra y zonas climáticas de verano, identificadas con un número. En total en España se ubican 12 zonas climáticas y Canarias $\alpha 3$. También se ha definido la severidad climática. Es una variable climatológica que combina la temperatura y la radiación solar. Se observa que la clasificación climática de A Coruña es la clasificación C y el valor de transmitancia térmica máxima es 0,29 W/m²K.

Para calcular la transmitancia térmica se utiliza el coeficiente de conductividad térmica. Es un parámetro caracteriza al material. El Código en su DB HE-1:2013 especifica diferentes tipos de coeficientes de conductividad térmica que han de considerarse, λ diseño, λ_D declarada y λ envejecida declarada a 25 años. Es necesario su conocimiento preciso. (Ver apartado anterior)

El procedimiento de cálculo de la opción simplificada se hace de toda la envolvente y puede observarse en la siguiente tabla:

SUBSECCIÓN DE ESTE APARTADO	ETAPA	APARTADO DEL CTE DB HE 1
DATOS PREVIOS		
A	Determinación de la zona climática	3.1.1 y apéndice D
B	Clasificación de los espacios	3.1.2
C	Envolvente térmica y cerramientos	3.1.3
APLICACIÓN DE LA OPCIÓN SIMPLIFICADA		
D	Comprobación de la aplicabilidad	3.2.1.2
E	Cálculo de los parámetros característicos de los cerramientos y particiones	Apéndice E
LIMITACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA		
F	Comprobación de transmitancias térmicas de componentes	Tabla 2.1
G	Cálculo de los parámetros característicos medios	3.2.2.1
H	Comprobación de los parámetros característicos medios	3.2.2.2 y Tabla 2.2
I	Cálculo de las condensaciones intersticiales y superficiales	3.2.3
J	Justificación mediante fichas justificativas y formulario de conformidad	Apéndice H

Tabla II.15: Resumen del procedimiento de cálculo según la opción simplificada (Zabalza et al, 2007)

Consideración de la cámara de aire en el CTE para la transmitancia térmica

Una de las preguntas a responder es la forma en la que es considerada la cámara de aire por el Código. Para la definición y clasificación de las cámaras de aire se puede ir a los documentos (DB HE-1:2013 y DA-DB HE-1)**, al estándar ISO 6946:2012*, al DB HS-1:2013 y la ETAG 034 de fachadas ventiladas.

La definición de cámara o cavidad ventilada atendiendo a su grado de abertura para ventilación está definida en el DB HE-1:2013 y el DA DB HE-1:2013. También la norma ISO 6946:2012, en su apartado 5.3 resistencia térmica de las cámaras de aire las define y clasifica. Estos tres documentos poseen el mismo tipo de clasificación y que es el siguiente:

Cámara de aire no ventilada* o sin ventilar:** La define como aquella en la que no se ha dispuesto expresamente que se dé flujo de aire a través de ella. La norma expresa que también deben considerarse como una cámara de aire no ventilada si estas aberturas no están dispuestas para permitir el flujo de aire a través de la cámara no exceden de 500 mm² por metro lineal (en la dirección horizontal) para las cámaras de aire verticales. Para el cálculo de la resistencia térmica, la norma recoge la tabla 2.

Cámara de aire débilmente ventilada* o ligeramente ventilada:** En este caso la norma define a la cámara débilmente ventilada donde se dispone de un flujo limitado de aire mediante aberturas de área A_v en el paramento exterior entre el rango $> 500 \text{ mm}^2$ y $< 1\,500 \text{ mm}^2$ por metro lineal (en la dirección horizontal) para las cámaras de aire verticales. Como una aproximación, la resistencia térmica total de un componente con una cámara de aire ligeramente ventilada puede calcularse.

Cámara ventilada* o muy ventilada:** Es aquella en la que las aberturas entre la cámara de aire y el ambiente exterior sean iguales a o superiores a 1 500 mm² por metro lineal (en la dirección horizontal) para las cámaras de aire verticales

La resistencia térmica total de un componente del edificio que contiene una cámara ventilada debe obtenerse despreciando la resistencia térmica de la cámara de aire y del resto de capas

entre la cámara de aire y el ambiente exterior, e incluyendo una resistencia superficial exterior que corresponda al aire (véase el anexo A). Alternativamente, puede utilizarse el valor correspondiente de Rsi dado en la tabla 1.

Por el contrario, los documentos DB HS-1:2013 y la ETAG 034 de fachadas ventiladas no clasifican de la misma forma la ventilación.

En el caso del DB HS-1:2013, es la prestación B3 la que define la cámara de aire ventilada que indica una ventilación de 120cm^2 por cada 10m^2 de superficie entre forjados. Haciendo una correspondencia en mm^2 , se deduce que existirán 3000mm^2 por cada metro lineal de fachada, no correspondiendo con los 1500mm^2 según se establece en las condiciones térmicas.

El documento ETAG 034 define una cámara como ventilada cuando se cumplan al menos 50cm^2 por metro lineal, es decir, 5000mm^2 por cada metro lineal, muy por encima de los 1500mm^2 que establece la norma.

DOCUMENTO	NO VENTILADA	DÉBILMENTE LIGERAMENTE VENTILADA	MUY VENTILADA
ISO 6946:2012	$<500\text{mm}^2$ por ml	500mm^2 a 1500mm^2 por ml	$>1500\text{mm}^2$ por ml
CTE DA DB HE-1:2013 y DB HE-1:2013	$<500\text{mm}^2$ por ml	500mm^2 a 1500mm^2 por ml	$>1500\text{mm}^2$ por ml
CTE DB HS-1:2013	-	-	$>3000\text{mm}^2$ por ml
ETAG 034	-	-	$>5000\text{mm}^2$ por ml

Tabla II.16: Tabla resumen de la clasificación de la cámara de aire según superficie de aberturas y documento referenciado

Se ha realizado el cálculo simplificado del CTE DA DB HE-1:2013 de la transmitancia térmica de una fachada ventilada de granito según diferentes tipos de ventilación en la cámara de aire. En las siguientes tres tablas se muestra las tres condiciones que establece la normativa en función de la ventilación de la cámara de aire en el cerramiento.

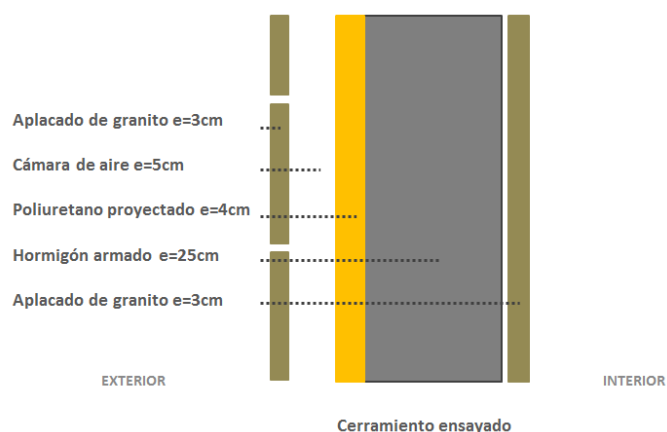


Figura II.38: Cerramiento de fachada ventilada de granito para el cálculo de la transmitancia térmica

CERRAMIENTO FACHADA VENTILADA DE GRANITO MUY VENTILADA			
Cálculo de transmitancia térmica según el CTE DA DB HE-1			
	e (m)	λ (W/mK)	R=e/λ
Resistencia interior			0,13*
Granito	0,03	2,8	0,01
Mortero cal y cemento	0,01	0,7	0,01
Hormigón armado	0,25	1,6	0,16
PUR	0,03	0,025	1,20
Cámara de aire muy ventilada	0,05		
Granito	0,03		
Resistencia exterior			0,13*
			1,64 (U=0,609)

Tabla II.17: Cálculo de transmitancia térmica en el caso de la fachada con cámara muy ventilada

CERRAMIENTO FACHADA VENTILADA DE GRANITO DEBILMENTE VENTILADA			
Cálculo de transmitancia térmica según el CTE DA DB HE-1			
	e (m)	λ (W/mK)	R=e/λ
Resistencia interior			0,13*
Granito	0,03	2,8	0,01
Mortero cal y cemento	0,01	0,7	0,01
Hormigón armado	0,25	1,6	0,16
PUR	0,03	0,025	1,20
Cámara de aire debilmente ventilada	0,05		0,09
Granito	0,03	2,8	0,01
Resistencia exterior			0,04*
			1,65 (U=0,606)

Tabla II.18: Cálculo de transmitancia térmica en el caso de la fachada con cámara débilmente ventilada

CERRAMIENTO FACHADA VENTILADA DE GRANITO SIN VENTILAR			
Cálculo de transmitancia térmica según el CTE DA DB HE-1			
	e (m)	λ (W/mK)	R=e/λ
Resistencia interior			0,13*
Granito	0,03	2,8	0,01
Mortero cal y cemento	0,01	0,7	0,01
Hormigón armado	0,25	1,6	0,16
PUR	0,03	0,025	1,20
Cámara de aire sin ventilar	0,05		0,18
Granito	0,03	2,8	0,01
Resistencia exterior			0,04*
			1,74 (U=0,574)

Tabla II.19: Cálculo de transmitancia térmica en el caso de la fachada con cámara sin ventilar

Se observa que el valor de la transmitancia térmica entre débilmente ventilada y muy ventilada apenas tiene repercusión la variación desde el punto de vista térmico. Sin embargo, no es así cuando la cámara de aire está cerrada. El no disponer de una cámara ventilada mejora el valor de la transmitancia térmica en aproximadamente un 6%.

Si se comparan los resultados con los obtenidos de los cálculos realizados por el estándar ISO 6946:2012, los de la cámara sin ventilar y ventilada son los mismos. Para el supuesto de la cámara de aire débilmente ventilada se aplica una fórmula:

$$R_T = \frac{1500 - A_v}{1000} R_{T,u} - \frac{A_v - 500}{1000} R_{T,v} \quad \text{Unidades: [m}^2\text{K/W]}$$

Dónde:

R_T [K m²/W] Resistencia térmica total
 A_v [m²] Área de ventilación

De esta forma y según la superficie de huecos de ventilación (entre 500mm² a 1500mm² por metro lineal), la transmitancia térmica del cerramiento variará entre 0,571 a 0,609 W/m²K

Comprobación de las condensaciones intersticiales y superficiales

Para la comprobación de las condensaciones intersticiales y superficiales, el C.T.E. en su apartado DB HE-1:2013 indica que deben comprobarse mediante cálculo si existe probabilidad de condensaciones. Se hace referencia al DA DB HE-1:2013 en el cual explica el procedimiento basado en la norma UNE EN 13788: 2012. Para el cumplimiento son dos apartados, las condensaciones superficiales y las intersticiales. Se definen unas condiciones comunes del ambiente exterior e interior para el cálculo.

Para las comprobaciones de las condensaciones superficiales se define del factor de temperatura de la superficie interior de un cerramiento y el factor de temperatura de la superficie interior mínimo para las condiciones interiores y exteriores del mes de enero de la localidad. El factor de temperatura de la superficie interior de un cerramiento se calcula a partir de su transmitancia térmica.

En el caso de las condensaciones intersticiales se basa en la comparación de la presión de vapor y la presión de vapor de saturación, representando gráficamente las distribuciones de presiones de vapor de saturación y de presiones de vapor en un elemento multicapa.

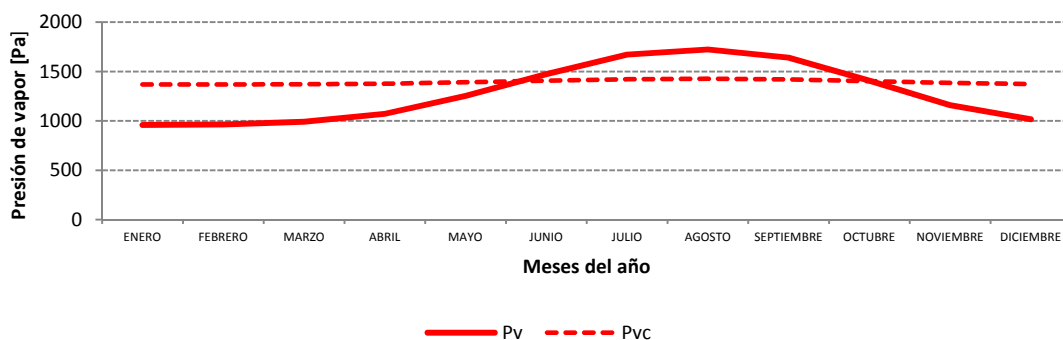


Figura II.39: Presión de vapor exterior y de la cámara (suponiendo casi cerrada) obtenidos de los valores ambientales exteriores e interiores indicados en el DA DB HE-1

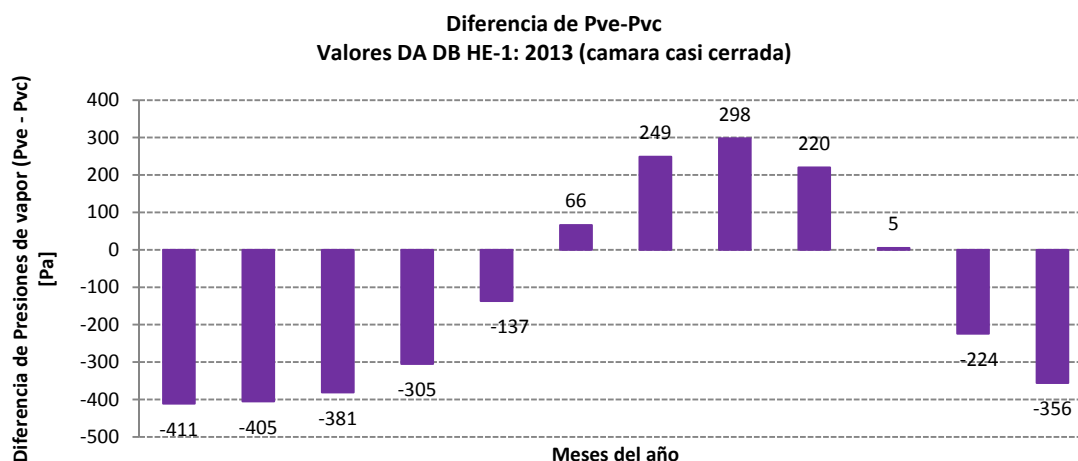


Figura II.40: Diferencia de presiones de vapor del exterior y de la cámara casi cerrada (Pv-Pvc) mensuales obtenidos del apéndice del procedimiento DA DB HE-1:2013

En la figura II.40, que representan las presiones de vapor de agua, se ve que son los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre en los que la diferencia es positiva, mientras que el resto de meses la diferencia es negativa.

Los cálculos realizados siguiendo el procedimiento indican que no existirán condensaciones superficiales. En cuanto a las condensaciones intersticiales, son los meses de diciembre, enero, febrero y marzo que pueden existir riesgos de condensación en la cámara y en la superficie del poliuretano.

II.2.2 MARCO INTERNACIONAL

Tras analizar la fachada ventilada a estudio, a tenor del C.T.E., y constatando que no existe en España una normativa específica, nos disponemos a ver qué hay en el marco internacional. La organización europea para la evaluación técnica (EOTA) ha elaborado una guía para la aprobación del documento Técnico Europeo de fachada ventilada. Sirven para elaborar estos documentos alternativos al marcado CE. No suponen una garantía de calidad, si bien establecen una serie de requisitos exigidos para ser comercializados en el mercado europeo ya que no poseen una normativa específica.

La guía que hace referencia a las fachadas ventiladas es la *ETAG 034: Kits for external Wall claddings* ya referenciada en el apartado anterior. En ella se definen las prestaciones y se hace referencia a los comportamientos mínimos que deben ser verificados y que este tipo de productos puedan ser comercializados. La guía está estructurada en requerimientos esenciales.

El requerimiento esencial que hace referencia a la higiene, salud y medio ambiente es el ER3. Habla de la humedad en el ambiente interior. Dos requisitos tienen que ser considerados: la resistencia a la humedad del exterior y evitar la condensación en las superficies internas de la pared y la condensación intersticial. Estos requisitos corresponden claramente a los establecidos en el Código Técnico de la Edificación C.T.E. en el apartado ya visto.

En este documento hace una pequeña referencia a las condiciones de alto vapor de agua, y en el que se tenga en consideración mediante un diseño adecuado de los productos y la elección de los materiales: *“Donde haya una incidencia alta de vapor de agua internamente, se tomarán las precauciones adecuadas para evitar que el sistema se humedezca, por ejemplo, mediante un diseño adecuado de los productos y la elección de los materiales.”* (ETAG 034, 2011)

En el apartado 4.3.1 del ER3 vienen indicadas las prestaciones del aplacado para un ambiente húmedo. Éstas se refieren a la estanqueidad de juntas, a la permeabilidad al agua, a la permeabilidad al vapor de agua y al drenaje. Se exponen los métodos de verificación que deben ser considerados para evaluar estas prestaciones. Se indican valores de referencia para ser considerado aceptable su comportamiento, y, por lo tanto aceptar la solución constructiva.

En concreto para evaluar el grado de impermeabilidad de un revestimiento se analiza las características de los materiales utilizados y la geometría del elemento de revestimiento externo y las juntas. Para el ensayo de juntas estancas se remite a la UNE EN12865 Procedimiento A (600 Pa máximo) indicada en el Catálogo de materiales de construcción. El uso de un determinado tipo de sistema de revestimiento dependerá de la severidad del clima y su exposición con respecto a la pared de soporte. En el caso de las condensaciones, se realizarán según cálculos normativos procedentes

Se hace también referencia, en el apartado de vida útil del sistema constructivo, a la necesidad de evitar que el agua discurra por la superficie exterior del cerramiento, ya que los materiales podrían verse afectados de manera adversa.

Condicionantes térmicos en Europa

Como se dijo anteriormente, la transposición de la Directiva europea 2010/31/UE relativa a la *eficiencia energética en los edificios*, exige a los países miembros establecer unas condiciones que garanticen el consumo de energía casi nulo para las edificaciones. El establecimiento del valor-U de transmitancia térmica en la envolvente es uno de los objetivos. Los Códigos de Edificación de cada país europeo deben establecer estos valores límite máximo.

Dada la diversidad de las condiciones climáticas en Europa, este parámetro varía ampliamente entre los diferentes países. En algunos, las variaciones también se aplican para tipos de edificios (por ejemplo, Letonia) y tipo de calefacción (por ejemplo, Suecia). A continuación se muestra el valor máximo de U de los muros (en rojo). Como se observa en el año 2007, los rangos de transmitancia térmica son muy amplios, con valores entre 1,57 W/m² K de Malta a 0,17 W/m² K en Finlandia.

La transposición de la Directiva europea de eficiencia energética en el marco de prestaciones de aislamiento térmico supone un enfoque general homogéneo para el ahorro de energía en todos los países miembros de la Unión Europea.

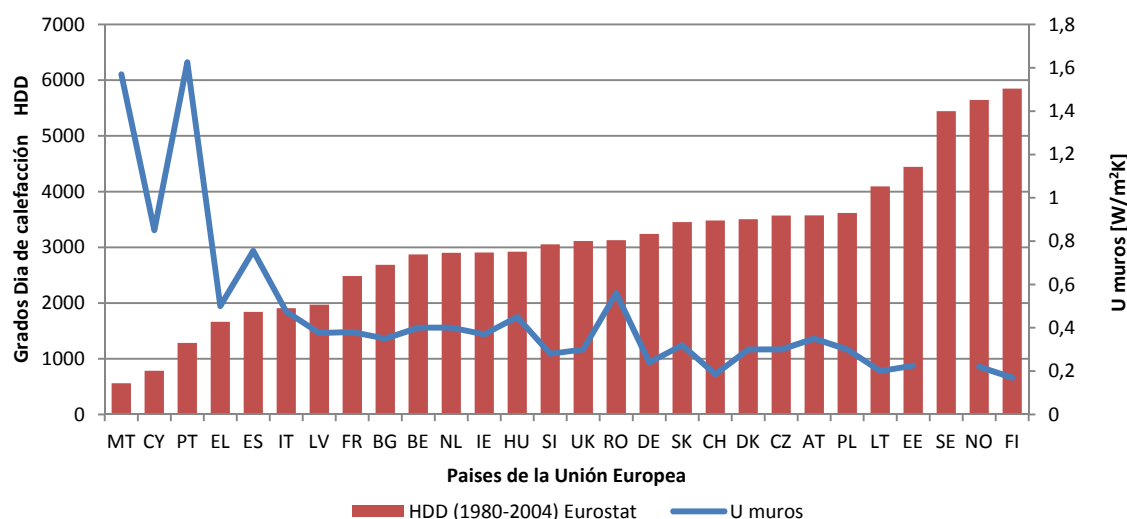


Figura II.41: Valores de grados día de calefacción HDD y transmitancia térmica, valor U máximo de muros en los países miembros de la Unión Europea

Además del parámetro de la transmitancia térmica, el CTE utiliza los valores de los Grados Día de Calefacción o HDD para realizar cálculos energéticos. Este parámetro es una medida diseñada para medir la demanda de energía necesaria para calentar un edificio. Se ha querido representar en un gráfico los grados día de calefacción indicados como HDD y la transmitancia térmica, valor U para observar la relación existente entre estos dos parámetros utilizados en el control de la energía en los edificios.

Representando la relación entre los HDD y el valor U de transmitancia térmica, se observa que los países con temperaturas más extremas poseen los mayores valores. Esto se cumple en el caso de Finlandia (FI), Noruega (NO), Lituania (LT) o Estonia (EE).

Pero la pregunta a plantear siguiente sería que sucede si se analizan zonas climáticas con el nivel hídrico más similares. Se han elegido las regiones atlánticas limítrofes de Galicia, estos valores son representados en una gráfica que representa simultáneamente los valores de HDD con los valores U de cada área territorial.

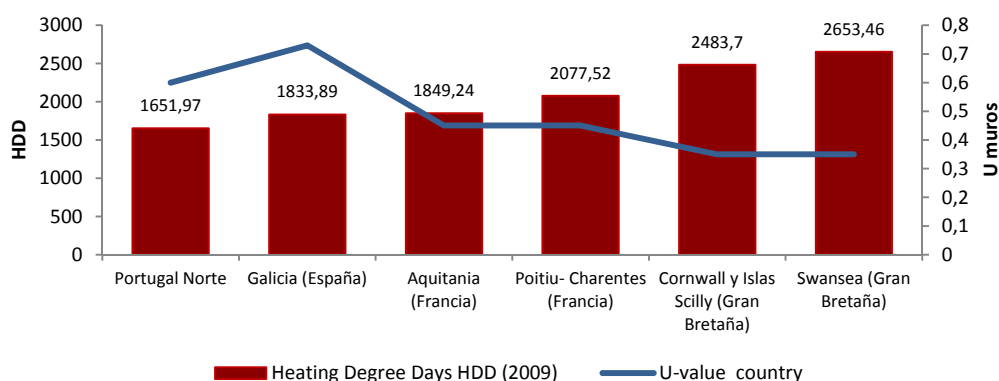


Figura II.42: Valor U exigido por los países según códigos nacionales y HDD de diversas áreas. Fuente Papadopoulos (2005) y Eurostat (2009).

Esta figura II.42 muestra territorios similares en valores de HDD y las exigencias que los estados piden a los cerramientos. Se observa que el área norte de Portugal y Galicia son muy similares a ciertas regiones de Francia, con valores superiores exigidos de transmitancia térmica.

Se concluye que habiendo HDD similares en la costa atlántica, no han sido similares las exigencias de transmitancia térmica, valor U en el año 2009. Galicia era la región atlántica analizada en los años indicados con menos exigencias térmicas a pesar del valor de los grados días, siendo en la actualidad Portugal el lugar con valor más alto de transmitancia térmica.

Condicionantes hídricos en Gran Bretaña

A continuación se han elegido para analizar los aspectos hídricos de los Códigos de Gran Bretaña. No existe un Código único. Existe uno para Inglaterra y País de Gales y otro para Escocia. Se denominan *The Building Regulations*. En el caso de la normativa inglesa y País de Gales, el *Approved Document* es de aplicación el C2 Resistencia a la humedad. En el caso de Escocia, están en dos documentos técnicos dependiendo si es vivienda o no. Los requerimientos de un sistema de cerramiento con resistencia a la humedad exterior y condensación están descritos en la sección 3. *Environment* con sus apartados 3.4 Humedad del subsuelo 3.10 Precipitación y 3.14 Condensación intersticial.

Concepto	Inglaterra y País de Gales	Escocia	España
Exigencias técnicas, administrativas y documentales	The Building Regulations	The Building Regulations	C.T.E. Parte I
Disposiciones técnicas	Technical Handbooks	Technical Handbooks	C.T.E. D B
Naturaleza de la norma	Prestacional	Prestacional	Prestacional
Alternativas de cumplimiento	European & British Estándar Code of Practice Certificación acreditada Bajo responsabilidad técnica	European & British Estándar Code of Practice Certificación acreditada	Soluciones alternativas bajo responsabilidad técnica Documentos Reconocidos
Exigencia básica de protección frente a la humedad	Approved Document C2 Resistance to moisture	Technical Handbook 3.4 Moisture from the ground 3.10 Precipitation 3.15 Condensation	C.T.E. DB HS-1 Protección frente a la humedad

Figura II.20: Tabla comparativa de las norma en materia de protección contra la humedad de Gran Bretaña y España (Pérez Bella, 2012)

La exposición climática

En este país están definidos los parámetros que relacionan la lluvia dirigida con el viento, denominada lluvia batiente. Este tipo de precipitaciones son las que, en definitiva, provocan el ingreso del agua en los cerramientos. Existe un mapa de Gran Bretaña donde se clasifican según las zonas de exposición (1-2-3-4).

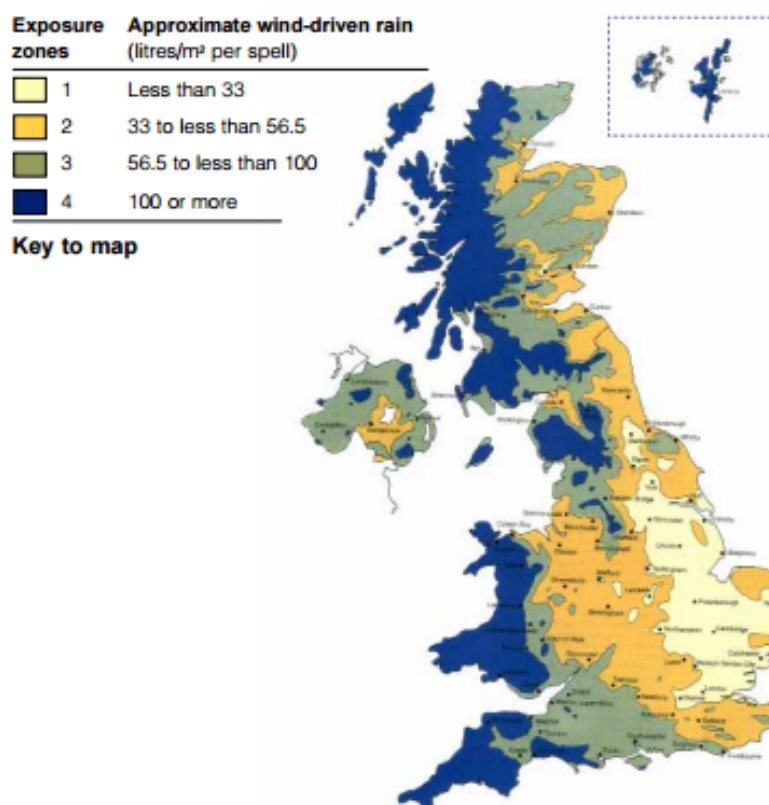


Figura II.43: Zonas de exposición (1-2-3-4) a la lluvia batiente (*Wind Driven Rain*) en Gran Bretaña

En el caso de la **evaluación del clima**, las dos normas hacen referencia al estándar británico **BS 8104:1992**– *Assessing exposure of walls to wind-driven rain*. Recoge un período de lluvia batiente (WDR) de 33 años, desde 1959 hasta 1991. Se basan en una serie de trabajos de investigación para evaluar una clasificación de exposición hídrica con el fin de predecir el riesgo de la penetración del agua en los cerramientos.

Otro procedimiento diferente a la norma británica BS 8104 para el cálculo de un índice de lluvia batiente es la norma **UNE EN ISO 15927-3:2009** titulada *Comportamiento higrotérmico de edificios. Cálculo y presentación de datos climáticos. Parte 3: Cálculo de un índice de lluvia para superficies verticales (Driving Rain Index) a partir de datos horarios de viento y lluvia*. Si bien los procedimientos son similares, el objetivo es el mismo, realizar una evaluación climática que ayude a predecir el riesgo de penetración del agua en la edificación.

Soluciones constructivas propuestas

Para responder a la exposición climática, las dos normativas exponen tipologías concretas. Para poder extrapolar nuestra fachada a las condiciones climáticas británicas, y en ausencia de aplacados ventilados, se han elegido dos soluciones que pudieran ser más semejantes. La primera, se representa en la figura siguiente y es un cerramiento de dos hojas con cámara de aire rellena parcialmente de aislamiento térmico. La diferencia con la solución española es que la piel exterior posee menos espesor y está más ventilada la cámara debido a las juntas abiertas entre los aplacados de granito. Aun así se ha querido conocer las recomendaciones de esta solución.

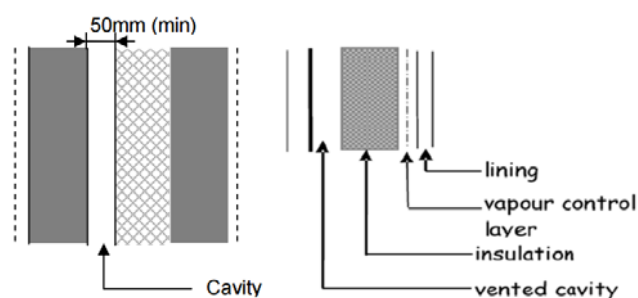


Figura II.44: Muro tipo C: Cerramiento vertical de dos hojas y con relleno parcial de aislamiento. (Technical Booklet C)

No se exige una protección del revestimiento exterior puede tenerlo o no y el espacio de la cámara será de 50mm. En el año 2013, el gobierno Escocés ha realizado un análisis de sus detalles para la protección contra la lluvia. En esa revisión se han propuesto los siguientes cambios: el uso de al menos un ancho de cámara de 50mm o mayor y/o el uso de un *revoco exterior* en las exposiciones más altas, zona 4.

En el segundo caso analizado, el cerramiento con subestructura ligera, la norma establece que en este caso el revestimiento exterior deberá ser éste impermeable. El muro tendrá una barrera de control de vapor por la cara interior y un revestimiento interior. La cámara estará ventilada arriba y abajo (*vented*).

Para hacer recomendaciones y desarrollar soluciones alternativas a las que la norma establece, se remite al estándar británico BS 5628-3 denominado *Código para el uso de obras de fábrica. Los materiales y componentes, diseño y mano de obra*. Esta norma posee una interesante tabla donde se indica la capacidad de soportar la exposición al ambiente según el tipo de obra de fábrica. En el caso de un muro de hormigón, se expone que para que no sea revestido debe tener un espesor de al menos 215mm. Para un hormigón revestido la categoría de exposición será de 3 como máximo. Para llegar a la máxima categoría de exposición, 4, deberá disponerse de un revestimiento impermeable (*cladding*).

En el caso de la tipología de cerramientos, la norma inglesa hace referencia a la tabla 4, donde se relaciona a la zona de exposición con las diferentes soluciones constructivas. Se observa que los cerramientos de hoja doble, con la cámara parcialmente rellena de aislamiento y espesores de cámara de aire de 50mm o más, son de las soluciones constructivas que poseen la mayor resistencia a los ambientes de mayor exposición o zona 4.

Esta lectura rápida, directa y clara en la norma inglesa no se corresponde con la situación en España. Se ha de ir al catálogo de elementos constructivos para ver cómo cada solución constructiva dispuesta está clasificada con el grado de impermeabilidad ambiental. Pero lo que resulta al final es una clasificación del grado de impermeabilidad según un ensayo de laboratorio de la solución constructiva, que tampoco queda claro los valores.

Table 4: MAXIMUM RECOMMENDED EXPOSURE ZONES FOR INSULATED MASONRY WALLS								
Maximum recommended exposure zone for each construction								
Wall construction								
Insulation method	Min with of filled or clear cavity (mm)	Impervious cladding		Rendered finish		Facing masonry		
		Full height of wall	Above facing masonry	Full height of wall	Above facing masonry	Tooled flush joints	Processed mortar joints	Flush sills and copings
Built-in full fill	50	4	3	3	3	2	1	1
	75	4	3	4	3	3	1	1
	100	4	4	4	3	3	1	2
	125	4	4	4	3	3	1	2
	150	4	4	4	4	4	1	2
Injected fill not UF foam	50	4	2	3	2	2	1	1
	75	4	3	4	3	3	1	1
	100	4	3	4	3	3	1	1
	125	4	4	4	3	3	1	2
	150	4	4	4	4	4	1	2
Injected fill UF foam	50	4	2	3	2	1	1	1
	75	4	2	3	2	2	1	1
	100	4	2	3	2	2	1	1
Partial fill								
Residual	50	4	4	4	4	3	1	1
50mm cavity								
Residual	75	4	4	4	4	4	1	1
75mm cavity								
Residual	100	4	4	4	4	4	2	1
100mm cavity								
Internal insulation								
Clear cavity	50	4	3	4	3	3	1	1
50mm								
Clear cavity	100	4	4	4	4	4	2	2
100mm								
Fully filled cavity	50	4	3	3	3	2	1	1
50mm								
Fully filled cavity	100	4	4	4	3	3	1	2
100mm								

Tabla II.21: Tabla 4 de recomendación de zonas de exposición máximas para muros de cerramiento aislados.
(Approved Document C, 2012)

Con respecto a las condensaciones intersticiales, las dos normas remiten al estándar británico BS 5250:2002 Código de práctica para el control de la condensación en los edificios para el cálculo de su envolvente.

Se concluye que la norma inglesa define un parámetro relevante ambiental que es la lluvia batiente. Los estudios de este parámetro en el país son de gran utilidad para correlacionar y exigir unas mayores prestaciones a las situaciones con mayor carga hídrica.

El caso de Canadá

El marco normativo de este país se establece en el National Building Code of Canada NBC desarrollado por el National Research Council of Canada NRC, institución que desde el año 1941 lleva definiendo las prestaciones en la edificación.

Existen también estándares de aplicación que complementan al Código y, aunque son algunos son de obligado cumplimiento, otros se corresponden sólo con buenas prácticas. Están redactados fundamentalmente por las organizaciones Canadian General Standards Board (CGSB), Canadian Standards Association (CSA), Underwriters Laboratories of Canada (ULC), y the Bureau de normalisation du Québec (BNQ).

El Código se divide en tres divisiones. División A - Cumplimiento, Objetivos y Declaraciones Funcionales. División B - Soluciones Aceptables. Es donde se encuentran la parte técnica y división C - Disposiciones administrativas. Dentro de la división B, es la parte quinta y novena la

que recoge los mínimos requerimientos y especificaciones en relación al comportamiento higrotérmico.

Si bien el National Building Code es para todo el país, existen ciudades con su propio Código de aplicación como es el caso de **Vancouver Building By-Law** del año 2015. Esta ciudad en Canadá posee la misma clasificación climática Köppen Geiger Csb que A Coruña. Es la parte quinta y novena del Código la que contiene las especificaciones.

Las prestaciones requeridas se refieren al control de la acumulación y presión del agua del subsuelo, resistir el ingreso de lluvia, agua o humedad desde el exterior o desde el suelo, facilitar la disipación del agua y humedad del edificio y limitar la humedad producida por condensación.

Caracterización del ambiente o nivel de exposición

El primer paso para decidir la estrategia de control de la humedad a usar en un sistema de cerramiento es determinar las condiciones medioambientales o nivel de exposición en el cual estará este cerramiento. La exposición climática. Los factores considerados en Canadá son el *Driving Rain Wind Pressure (DRWP)* son datos que estiman los valores medios anuales de presión de viento (obtenidos de las velocidades de vientos) asociadas a lluvia suficiente que causa la filtración. Se suele indicar a una altura del edificio determinada que en este caso son 10m. En Canadá, el estándar utilizado es el (Canadian Standards Association) CSA A440.1 indica este valor para el territorio canadiense. Sin embargo, este valor no indica la frecuencia o duración de la exposición de lluvia dirigida con el viento. Para ello el National Research Council de Canadá ha definido otro factor denominado *Annual Driving Rain Index (ADRI)*

Esta institución también ha desarrollado el índice *Moisture Index (MI)*. Este factor es una combinación del Wetting Index (WI), que representa la lluvia dirigida con el viento al cual un muro puede ser expuesto, y el Drying Index (DI), que representa el potencial de secado ofrecido por el clima a través de la evaporación. Este parámetro intenta ser un indicador simple de las cargas de humedad inherentes al clima exterior.

Moisture Index MI	Severidad de carga
MI 0.70	Zona 1-Baja
0.70 MI < 0.80	Zona 2-Limitada
0.80 MI < 0.90	Zona 3- Moderada
0.90 MI < 1.00	Zona 4-Alta
MI 1.0	Zona 5-Severa

Tabla II.22: Severidad de carga ambiental indicada por el índice de humedad (MI)

El arquitecto o proyectista examinará los mapas de DRWP, ADRI y MI del estándar CSA A440.1 y extraerá la información para ir a una tabla donde se exponen los sistemas de cerramiento según su capacidad para resistir exposiciones ambientales. Para la obtención del MI se realizarán los cálculos según se recoge en las siguientes expresiones:

WI=precipitación anual o

WI=lluvia batiente sobre el cerramiento

$$DI = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^k \Delta w(h) \quad \text{Unidades: [kg agua/kg aire]}$$

Dónde:

$$\Delta w(h) = w_{\text{saturacion}} - w_{\text{out}} \quad \text{Unidades: [kg agua/kg aire]}$$

DI	Indice de secado	[kg agua/kg aire año]
$w_{\text{saturacion}}$	Masa de contenido de humedad	[kg agua/kg aire]
n	número de años	[-]
k	numero de horas	[h]

Los datos obtenidos son normalizados con la siguiente fórmula, utilizando los valores máximos y mínimos de las localizaciones estudiadas

$$I_{\text{normalizada}} = (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min})$$

Donde:

I Indice de interés (DI o WI)

Finalmente se obtiene el índice de humedad normalizado según la siguiente expresión:

$$MI = \sqrt{WI_{\text{normalizado}}^2 + (1 - DI_{\text{normalizado}})^2}$$

Atendiendo a este procedimiento, se han querido realizar los cálculos para la localización de A Coruña como si fuese una ciudad mas de Canadá. Los resultados han sido los siguientes que se muestran en la tabla. Se ha querido reproducir también los valores de otra ciudad canadiense para ver su similitud, clasificada en la clasificación climática de Köppen Geiger como Csb.

Localización	WI	WI norm	DI	Di norm	MI norm
A Coruña	1014	0.59	23.74	0.14	1.04
Vancouver BC	1058.2	-	16.10	-	1.09

Tabla II.23: Datos del parámetro del índice de Humedad MI para A Coruña (España) y Vancouver (Columbia Británica, Canadá)

De esta tabla se puede deducir que la localización de A Coruña posee una carga ambiental severa, zona 5, ya que el índice de humedad es 1.04, por lo que el cerramiento deberá tener una capacidad suficiente y adecuada a la carga hídrica severa.

Otro índice interesante es el índice de Scheffer o SCI. Este parámetro sirve para evaluar el riesgo de deterioro por humedad ambiental en la contrucción, fundamentalmente para las construcciones de madera. Existen tres clasificaciones climáticas de riesgo. La primera clasificada con un bajo índice de riesgo tiene valores SCI < 35, la segunda con un índice de

riesgo medio entre estos valores $35 \leq \text{SCI} < 65$ y la tercera con el mayor índice de riesgo $\text{SCI} \geq 65$.

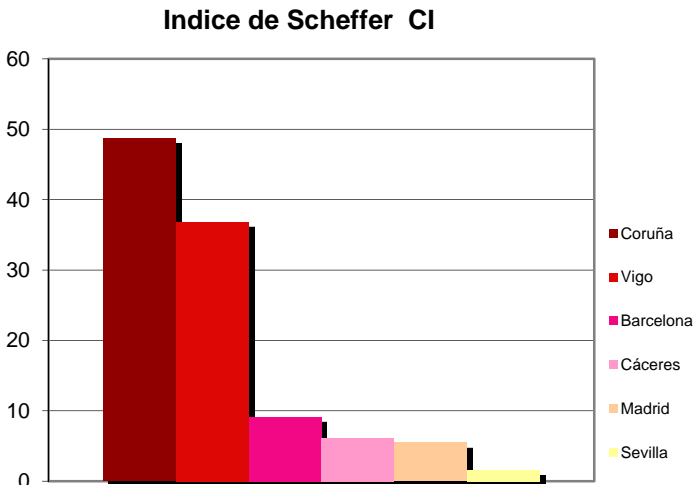


Figura II.45: Indice de Scheffer CI de localizaciones españolas

Esta figura II.45 se ha realizado aplicando la fórmula y con los datos climáticos de la AEMET, de diferentes localizaciones nacionales. Los resultados de las localizaciones de Sevilla, Madrid, Cáceres y Barcelona se agrupan en la primera clasificación. Sin embargo, es A Coruña y Vigo, con valores superiores a 35 que se agrupan en el segundo tipo de clima de riesgo. De todos los climas analizados es el de A Coruña el que posee un índice de Scheffer mas elevado.

Soluciones constructivas

Para definir una solución constructiva se utilizan unas tablas por tipologías como la siguiente.

Nivel de exposición	Sellada exterior	Barrera oculta	Rainscreen	Rainscreen con ecualización de presiones
Alta	Pobre	Pobre	Justa	Buena
Media	Pobre	Pobre	Buena	Buena
Baja	Justa	Buena	Buena	Buena
Ninguna	Buena	Buena	Buena	Buena

Alta: Cerramiento regularmente húmedo bajo condiciones de servicio normales y sujeto a exposición significativa del viento. Medio: Cerramiento frecuentemente húmedo bajo las condiciones de servicio normales. Bajo: Cerramiento raramente húmedo bajo condiciones normales de servicio. Ninguno: Cerramiento que nunca está húmedo bajo condiciones normales de servicio.

Figura II.24: Categorías esperadas de comportamiento en cerramientos en función de los niveles de exposición a la humedad

En esta tabla II.25 se relacionan los parámetro del nivel de exposición (alto, medio, bajo y ninguno), las cuatro diferentes tipologías y/o sistemas constructivos utilizados en Canadá y tres categorías de comportamiento esperado del cerramiento (malo, medio y bueno) bajo esas condiciones de exposición.

Es habitual en Canadá que, para controlar la penetración de la lluvia en el cerramiento, se diseñe la fachada ventilada con ecualización de presiones (*pressure equalized rainscreen*). El comportamiento supone que la presión existente en la cámara ventilada se iguala de valor en

segundo con la presión existente en el exterior y por lo tanto, se minimiza la fuerza (presión de viento) que provoca la penetración de lluvia en el cerramiento. Por lo tanto, en las situaciones de mayor exposición canadienses, es necesaria la utilización de esta tecnología en el cerramiento, ya que minimiza el ingreso de agua por lluvia batiente sobre el muro.

La figura II.46 muestra un procedimiento para simplificar la determinación de la exposición. Este monograma relaciona el tipo de terreno con su ambiente inmediato, la categoría de exposición para exigir una geometría determinada del voladizo del edificio. El cálculo a realizar de los aleros en los edificios, dónde el ratio es igual al ancho de protección entre la altura del muro.

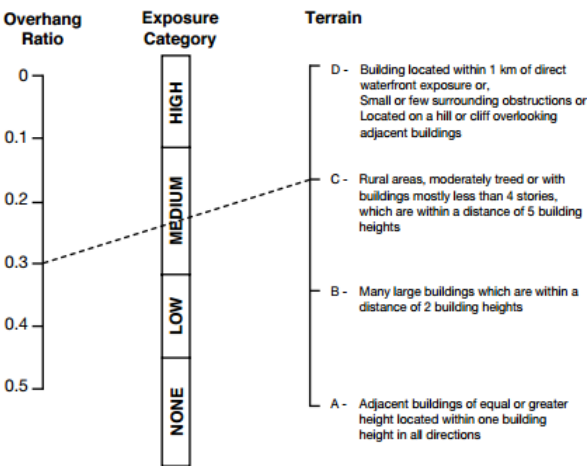


Figura II.46: Monograma de categoría de exposición.

El ámbito térmico

El National Research Council de Canadá publica también **National Energy Code of Canada for Buildings** (NECB) and the **National Energy Code of Canada for Houses** (NECH) como complemento a los anteriores Códigos en materia de energía.

En el aspecto térmico, son diferentes legislaciones las que definen unos valores límite de resistencia térmica nominal de aislamientos y de cerramiento. Se establecen una serie de requisitos mínimos que se deberán cumplir en relación a la eficiencia energética.

Define la máxima transmitancia térmica total para los componentes opacos en función de las fuentes de generación de calor para la calefacción. Puede verse a continuación la tabla con los valores máximos permitidos en la región de la Columbia Británica y la ciudad de Vancouver.

	Valor de Resistencia Térmica			
	Principal Fuente de calefacción			
Código o legislación vinculante	Gas natural		Electricidad, gasóleo, propano o bomba de calor aire-aire	
	RSI (U) K·m ² /W	R h·ft ² ·°F/Btu	RSI (U) K·m ² /W	R h·ft ² ·°F/Btu
B.C. Building Code				
Above-Grade Walls	2.45 (0.41)	R14	3.5 (0.29)	R20

Vancouver Building By-Law-Part 9 2015				
Walls	2.45 (0.41)	R14	3.5 (0.29)	R20
Vancouver Building By-Law-Part 3 2015				
Walls	2.1 (0.48)	R12	2.1 (0.48)	R12
National Energy Building Code of Canada 2011				
Above-Grade Walls	3.5 (0.29)	R20		

Tabla II.25: Valores nominales de resistencia térmica para la localización de Vancouver (Columbia Británica y Vancouver Canadá)

El Código de Edificación del año 2015, ha incorporado el concepto del **valor-R efectivo**. Este valor se corresponde con la resistencia térmica calculada en estado estacionario a la que se le ha añadido una estimación del efecto de la masa térmica. Sirve para cerramientos con alta inercia térmica y en condiciones de invierno. El gobierno de Canadá ha publicado tablas para calcular la R-efectiva.

Finalmente se creído interesante representar dos tipologías de cerramiento recomendadas en Vancouver. La primera solución tiene dividido el aislamiento, tanto en el interior como en el exterior. La segunda solución tiene el aislamiento por la cara exterior. Se ha clasificado como R-22 o de transmitancia térmica de $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$, muy similar a la transmitancia térmica que debe cumplir A Coruña $0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$.

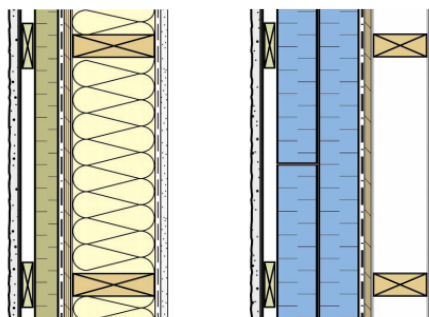


Figura II.47: Tipología de cerramientos rainscreen utilizados en Vancouver (Canadá) con R-22, denominados split insulation wall y exterior wall

Caso de Estados Unidos de América

En el caso de EEUU es también una organización gubernamental la que desarrolla la legislación aplicable. Se llama International Code Council. Para conocer las prestaciones higrotérmicas del cerramiento habrá que saber primero qué uso tiene el edificio. En el caso de construir edificios de viviendas unifamiliares o bifamiliares es de aplicación **el International Residential Code 2012**. Si los edificios son más grandes o comerciales es el **International Building Code** también del 2012. Se distribuye en 35 capítulos y anexos. El capítulo 14 hace referencia a los muros exteriores. Se definen requerimientos simples, como por ejemplo la protección contra la intemperie, protección contra la condensación. Se hace referencia al concepto de evitar esas

situaciones y referencian a materiales con los que se realizarán esos muros, así como se remite al cumplimiento de los estándares ASTM, AAMA, etc.

El ámbito de la envolvente con función térmica y de energía

Para las prestaciones relacionadas con la energía son de aplicación los códigos denominados **International Energy Conservation Code (IECC)** de 2012 y **International Existing Building Code, ICC Performance Code**, entre otros.

Para definir las prestaciones de resistencia térmica de la envolvente, el Código primeramente clasifica el clima del país en ocho zonas y de uno a ocho subzonas a lo largo de EEUU. Las zonas están basadas en los grados día de calefacción HDD y los grados día de refrigeración CDD y las condiciones de humedad. Una vez clasificado el clima, y según el tipo de cerramiento, el código indica los parámetros máximos de resistencia térmica que deberán poseer.

Además del International Energy Conservation Code, el standar **ASHRAE 90.1** sirve como línea de base de la eficiencia energética para edificios comerciales y edificios residenciales más altos de tres plantas.

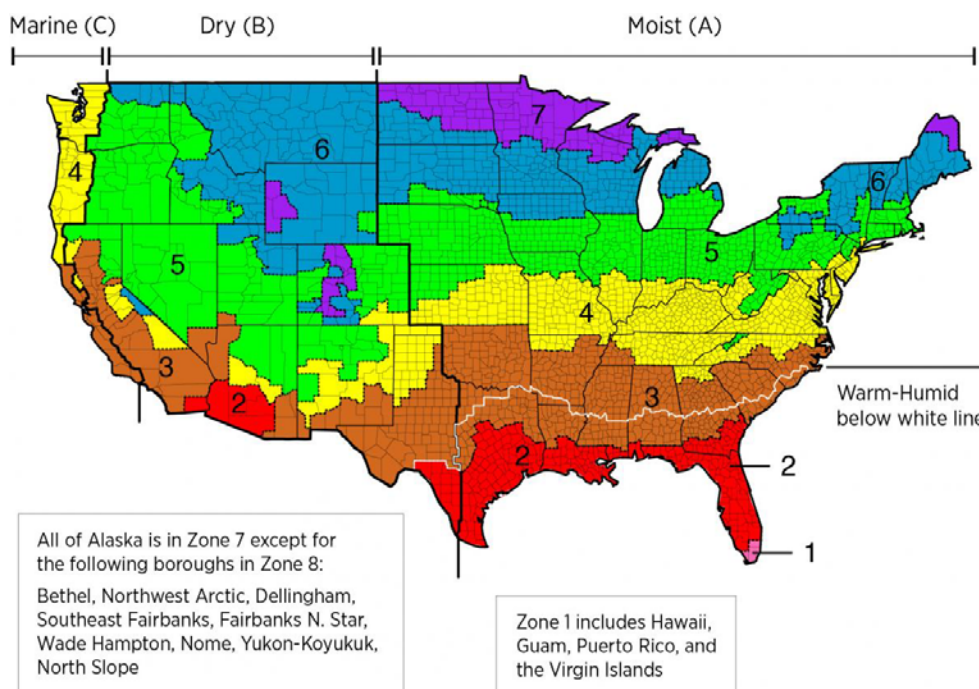


Figura II.48: Clasificación climática para la determinación de los valores R máximos para EE.UU. (IECC, 2012)

El nombre completo de esta norma es la norma ANSI / ASHRAE / IESNA 90.1 Energía Estándar para Edificios excepto edificios residenciales de baja altura. Establece también procedimientos para la determinación del consumo de energía, entre ellos la limitación máxima de la resistencia térmica del cerramiento.

Climate Zone	1	2	3	4	5	6	7	8								
				Except Marine	And Marine 4											
Mass	R-5.7ci	R-5.7ci	R-5.7ci	R-7.6ci	R-7.6ci	R-9.5ci	R-9.5ci	R-11.4ci	R-11.4ci	R-13.3ci	R-13.3ci	R-15.2ci	R-15.2ci	R-15.2ci	R-25ci	R-25ci
Metal building	R-13+6.5ci	R-13+6.5ci	R-13+6.5ci	R-13+R-13 ci	R-13+R-13 ci	R-13+R-13 ci	R-13+R-13 ci	R-13+R-13 ci	R-13+R-13 ci	R-13+R-13 ci	R-13+R-13 ci	R-13+R-13 ci	R-13+R-19.5 ci	R-13+R-19.5 ci	R-13+R-13 ci	R-13+R-19.5 ci
Metal Framed	R-13+R-5 ci	R-13+R-5 ci	R-13+R-5 ci	R-13+R-7.5ci	R-13+R-7.5ci	R-13+R-7.5ci	R-13+R-7.5ci	R-13+R-7.5ci	R-13+R-7.5ci	R-13+R-7.5ci	R-13+R-7.5ci	R-13+R-7.5ci	R-13+R-7.5ci	R-13+R-15.6ci	R-13+R-7.5ci	R-13+R-17.5ci
Wood Framed & Other	R-13+R-3.8ci or R-20	R-13+R-3.8ci or R-20	R-13+R-3.8ci or R-20	R-13+R-3.8ci or R-20	R-13+R-3.8ci or R-20	R-13+R-3.8ci or R-20	R-13+R-3.8ci or R-20	R-13+R-3.8ci or R-20	R-13+R-3.8ci or R-20	R-13+R-7.5ci or R-20+R-3.8 ci	R-13+R-7.5ci or R-20+R-3.8 ci	R-13+R-7.5ci or R-20+R-3.8 ci	R-13+R-7.5ci or R-20+R-3.8 ci	R-13+R-7.5ci or R-20+R-3.8 ci	R-13+R-15.6ci or R-20+R-10ci	R-13+R-15.6ci or R-20+R-10 ci

Tabla II.26: Datos de R máximos en todas las zonas climáticas de Estados Unidos para los muros opacos sobre rasante. (IECC, 2012)

En este país, los Códigos actuales correlacionan los valores de R con cerramientos ligeros como la madera pero, sin embargo, permiten construir también con valores más bajos de R que los indicados en cerramientos pesados. Esto es debido a que reconocen el efecto positivo que tiene la masa en sus propiedades térmicas. Los Códigos no son capaces de establecer esa rebaja puesto que es debida a las condiciones particulares en las que se disponga el cerramiento. Situación similar a la recogida en Canadá con el valor de R efectivo.

Normativa internacional en la predicción del comportamiento higrotérmico

Se observa que en todos los países, los cumplimientos de las prestaciones térmicas e hídricas deben ser satisfechos en documentos diferentes. Sin embargo, el comportamiento real higrotérmico de la fachada es indisociable. En este enfoque, durante los años 90, fueron numerosos los estudios que intentaban predecir el comportamiento de un cerramiento frente a la humedad y el calor. Ello llevó al desarrollo de nuevos estándares.

La Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) fue pionera en el desarrollo de un procedimiento para establecer los criterios para el análisis de la humedad en la edificación. En concreto, el estándar es denominado **ASHRAE 160P 2009, Design Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings**.

El propósito de esta norma es seleccionar los mejores criterios de diseño basados en las prestaciones con el objetivo de predecir, mitigar o reducir los daños por humedad en la envolvente del edificio, materiales, componentes, sistemas e instalaciones, dependiendo del clima, el tipo de construcción y operación del sistema de climatización.

Este análisis es muy relevante sobre todo en invierno y en climas fríos, donde las condiciones de humedad en fachadas se ven influenciadas fundamentalmente por las condiciones de humedad interior. Por lo tanto, es necesario establecer unas condiciones de diseño y asumir unas solicitaciones hídricas para realizar un análisis en el cerramiento y conocer si el comportamiento puede ser aceptable.

Los datos meteorológicos incluirán datos horarios de (a) temperatura del aire de bulbo seco, (b) presión de vapor o, temperatura del punto de rocío, temperatura de bulbo húmedo,

humedad relativa, o relación de humedad, (c) insolación total solar sobre una superficie horizontal, (d) velocidad media del viento y dirección, (e) precipitaciones, y (f) nubosidad.

A continuación se establecen los criterios mínimos aceptables para instrumentos de análisis capaces de analizar la transferencia y las condiciones térmicas y de humedad en la construcción de los componentes de la envolvente. El procedimiento tendrá la posibilidad de incluir: (A) el transporte de energía, incluyendo efectos de la temperatura de cambio de fase, (B) Propiedades de los materiales como una función del contenido de humedad y (C) Transporte de agua (líquido y vapor), incluyendo: transporte por capilaridad, deposición de humedad en las superficies, almacenamiento en materiales, difusión de vapor y las fugas de agua. Si el diseño incluye una cámara ventilada, el análisis deberá incluir los efectos de la cámara.

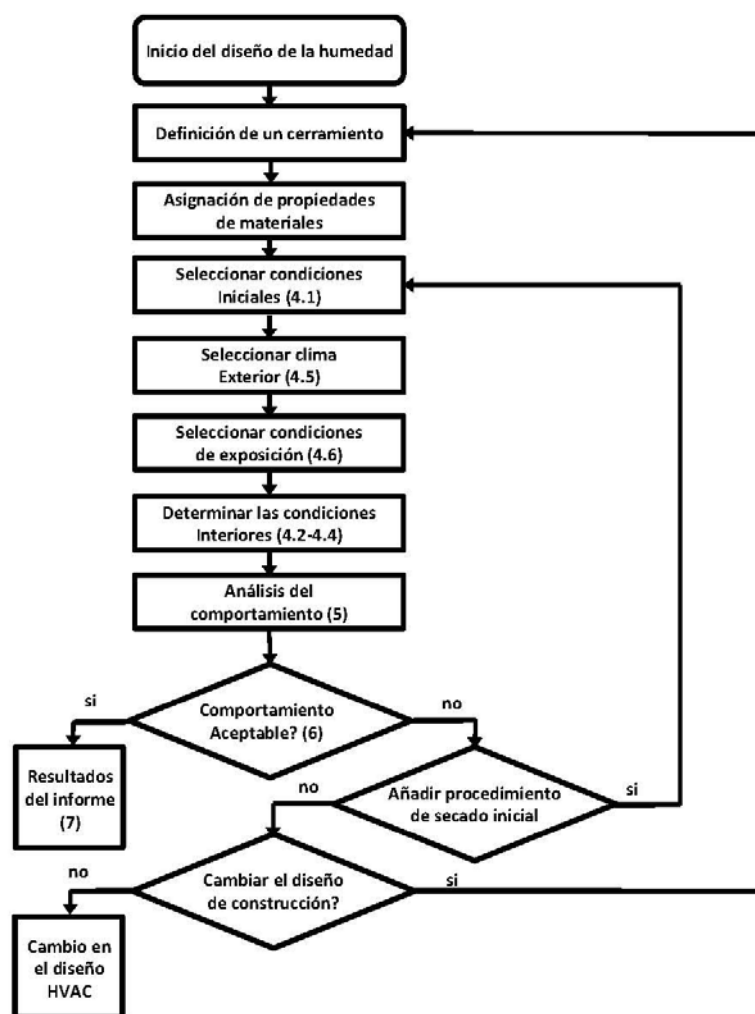


Figura II.49: Diagrama de flujo para el control de la humedad en la edificación usando el estándar ASHRAE 160P

El procedimiento analítico debe proporcionar la siguiente salida: (A) la temperatura y la humedad relativa en cada superficie de la superficie y en la interfase de las capas de material, (B) la temperatura promedio para cada capa de material, (C) el contenido promedio de humedad para cada capa de material.

Los datos sobre cada uno de los materiales componentes del edificio serán el espesor, la densidad, la conductividad térmica y su dependencia con la temperatura y contenido de humedad, si es aplicable, calor específico, la permeabilidad al vapor, isoterma de adsorción, la difusividad, isoterma de succión y el contenido inicial de humedad.

Este estándar es similar al propuesto en Europa y denominado **EN 15026:2007** Comportamiento higrotérmico de componentes de edificios y elementos constructivos. Evaluación de la transferencia de humedad mediante simulación numérica. (Ratificada por Aenor 2010). Este estándar es utilizado para predecir transferencia de calor y la humedad en estado transitorio unidimensional en varias capas de los componentes de construcción sometidos a condiciones de clima no constante a ambos lados. Las limitaciones de este estándar están en no considerar la convección, los puentes térmicos, fuerzas osmóticas, etc, ya que son motivo de análisis en al menos dos dimensiones.

En contraste con una evaluación de estado estacionario de la humedad por condensación o Método Glaser (descrito en la norma UNE EN ISO 13788:2002), el análisis numérico de simulación higrotérmica transitoria proporciona información más detallada y precisa sobre el riesgo de problemas de humedad dentro de los componentes del edificio y en el diseño de un posible tratamiento de corrección y que es en definitiva lo que se necesita.

Todos estos comentarios recogidos a lo largo de este apartado han tratado de recoger el enfoque higrotérmico de las normativas nacionales, así como algunas internacionales.

Finalizado el segundo apartado del capítulo II, **se concluye se ha dado respuesta al objetivo específico que trataba de analizar crítica y comparativamente las diferentes normativas internacionales en cuanto a las prestaciones higrotérmicas** en la fachada ventilada de granito definida.

En particular se analizó el **Código Técnico Español** en sus apartados, **DB HS-1:2013** en el comportamiento frente a la humedad y **DB HE-1:2013** relativo a la caracterización de la fachada a nivel térmico.

. Se ha detectado que se utilizan parámetros **climáticos** diferentes en el Código Técnico de la Edificación, según sea la prestación a cumplir DB HS-1:2013 o el DB HE-1:2013. En el primer caso, se nombra a partir del ambiente el concepto de grado de impermeabilidad (1 a 5) relacionado con valores de precipitaciones, elevación y vientos medios. En el caso térmico, se define a través de la temperatura y radiación solar.

En el primer caso se advierte la necesidad de utilizar otros parámetros más relevantes que correlacionen altamente con el riesgo de entrada de agua al cerramiento como es la lluvia incidente en combinación con el viento y presión sobre la superficie. En segundo lugar, se ha obviado el condicionante de las altas humedades relativas para el cálculo térmico. La contribución que el agua en sus distintas fases, así como en sus cambios de fase es relevante a nivel energético. Además se vería necesario una clasificación climática única para un análisis conjunto desde el punto de vista higrotérmico.

Se hace una comparación confusa entre el grado de impermeabilidad GI_{ensayo} y GI_{ambiente} . Los parámetros hídricos referenciados se evalúan de forma cualitativa, siendo dificultosa su

aplicación. Además para considerar una cámara de aire ventilada, el grado de ventilación varía según la normativa que se utilice.

. Desde el punto de vista del **diseño constructivo** la tradición marca significativamente las recomendaciones, ya que éstas están vinculadas a los materiales y sus propiedades. Para la prestación hídrica, el DB HS-1:2013 define tipos de soluciones estándares que puedan ser clasificadas para el grado de impermeabilidad 5. Hay contradicciones entre documentos y las prestaciones son poco objetivas y concretas, se echa en falta su cuantificación, así como más criterios en el caso de protección frente a la humedad para el cerramiento.

. A **nivel internacional**, se utilizan otros parámetros climáticos más apropiados, que tienen más en consideración la humedad relativa ambiental.

. Se han observado tipologías constructivas muy diferentes según el país. La madera es un material frecuentemente utilizado en los muros de cerramiento. En concreto, la **rainscreen** con ecualización de presiones es la solución típica para el ambiente de Vancouver (Canadá). También EEUU utilizan esta tipología constructiva.

. Con respecto a Gran Bretaña existen unas dimensiones mínimas de la cámara de aire en el cerramiento para responder a las situaciones ambientales de más riesgo. Hay control en las superficies exteriores. Se vincula a elementos unitarios constructivos la capacidad para soportar las solicitaciones hídricas.

. Se ha visto importante el manejo de los estándares que proporcionan un procedimiento para la predicción de los comportamientos higrotérmicos.

II.3 ESTUDIOS EXISTENTES SOBRE FACHADA VENTILADA

El tercer y último apartado del capítulo II plantea documentar la investigación previa referida al sistema constructivo de fachada ventilada en dos ámbitos: higrotérmico y energético. Se explican en la primera parte los estudios realizados de comportamientos higrotérmicos tanto experimentales como de simulación. En la siguiente son los estudios de flujos de calor y de valores de transmitancia térmica los que son analizados. Finalmente se realiza un resumen de las principales contribuciones de los investigadores en estos dos ámbitos y la problemática existente.

Si se habla de la humedad, las fuentes de agua son principalmente la lluvia, la condensación, el contenido de vapor de agua en el ambiente y/o en el suelo. La penetración del agua y/o altas concentraciones de vapor de agua en los materiales de construcción, empeoran sus propiedades físicas e incluso mecánicas, disminuyen su durabilidad, obteniendo comportamientos peores a los esperados. La capacidad del aire para retener agua es relevante pues existen movimientos del flujo de vapor de agua y éstos también influirán en los materiales de construcción. En el caso particular del clima de A Coruña (España), no sólo caracteriza por las precipitaciones, sino también por tener un alto contenido de vapor de agua en el ambiente, debido a su emplazamiento, rodeada de mar por todas partes.

La temperatura ambiental influye en la capacidad para retener agua en el aire y en la transferencia del calor. La transferencia de calor se produce a través de los fenómenos de radiación, conducción y convección, el cual puede ser parcialmente acumulado en los materiales como ganancia o transmitido al aire. Esta situación hace que se produzcan en los cerramientos movimientos continuos flujos de energía en la envolvente vertical en los dos sentidos desde o hacia el exterior.

Llegados a este punto, se hace necesario analizar estudios existentes de monitorizaciones del comportamiento higrotérmico, y en particular, de la transmitancia térmica en fachadas ventiladas y/o con cámara de aire. Estos valores de transmitancia térmica U son importantes porque forman la base de cualquier estándar térmico para la energía y, como consecuencia, para la reducción de las emisiones de dióxido de carbono.

II.3.1 COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

La envolvente de un edificio está en contacto permanentemente con el ambiente exterior. La temperatura, la humedad relativa, la radiación solar, las precipitaciones y el viento son los parámetros más representativos de este ambiente. La exposición a estos parámetros influirá en el comportamiento de la envolvente y en particular, sobre el comportamiento higrotérmico. En el caso de climas templados y lluviosos, como sucede en el Noroeste Peninsular español, el cerramiento se moja frecuentemente y el secado puede llegar a ser bajo. De aquí que, en este tipo de localizaciones, sea necesario conocer cómo es en la realidad el balance de secado y mojado, ya que la humedad afecta de forma determinante a la transmitancia térmica y a la durabilidad.

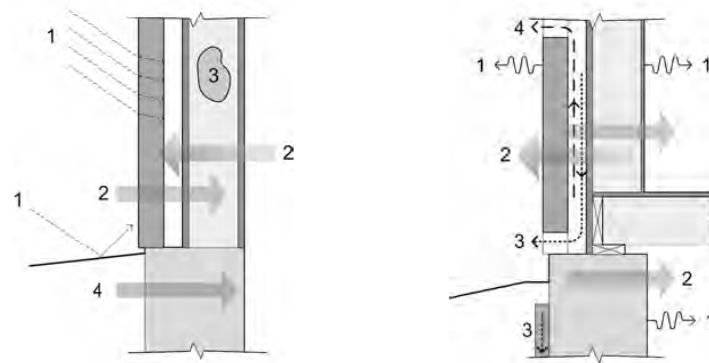


Figura II.50: Representación de los mecanismos de mojado y secado del cerramiento (Straube et al, 2009)

En el caso de la edificación Straube et al (2009) indican que los cuatro mayores mecanismos de transporte y almacenamiento de humedad que pueden dañar a un cerramiento son:

1. Vapor de agua en el aire transportado por difusión y/o movimiento de aire a través del muro (hacia el interior o exterior)
2. Humedad incorporada o almacenada, particularmente para hormigón y productos de madera
3. Agua líquida y niveles de agua subterránea, conducidas por capilaridad y gravedad
4. Humedad almacenada y/o en la construcción

Durante el proceso de secado de la humedad existente se realiza según los siguientes mecanismos:

1. Evaporación (agua líquida transportada por capilaridad a las superficies interiores o exteriores)
2. Evaporación y transporte de vapor por difusión, fugas de aire, o las dos hacia el interior hacia el exterior
3. Drenaje y agua líquida no absorbida, dirigida por gravedad
4. Ventilación por convección a través de cámaras de aire ventiladas detrás del cerramiento

Straube et al, (2009) para asegurar una durabilidad a largo plazo del cerramiento, se requiere un balance entre mojado, secado y su almacenamiento. La capacidad de secado de los materiales es variable y por lo tanto el sistema de cerramiento también variará. En algunos climas, incluso la capacidad de secado es insuficiente por lo que el proceso de deterioro surgirá. La solución debe ser utilizar diseños de cerramientos de rápido secado e impedir así el posible daño que pueda causar el agua y la humedad.

El standard americano ASTM E241-04 expone que existe en tres fuentes de agua en los cerramientos: la humedad exterior, la humedad interior y humedad contenida en los materiales. Para que el agua ingrese en un cerramiento debe establecerse dos condiciones. Primero que exista una fuente de agua. Segundo que las propiedades del material faciliten su entrada y permanencia. En lo que se refiere a la primera condición, el clima, el ambiente interior o exterior y el entorno en el que se localiza determina mayormente la cantidad de

agua posible de ingreso, aunque puedan existir contenidos de agua elevados en los materiales durante el proceso de ejecución.

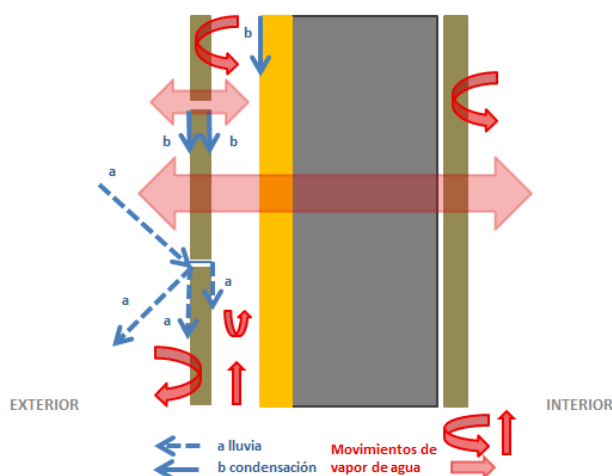


Figura II.51: Fachada ventilada de granito a ensayar: movimiento del agua líquida, movimiento del vapor de agua y transporte de vapor de agua

Un deficiente comportamiento higratérmico como un exceso de agua y/o humedad ambiental o interior, iniciará en muchos casos un deterioro hídrico y/o biodeterioro de los materiales y como consecuencia del cerramiento. La predicción resulta, pues, de suma importancia para evitarlo.

Con el fin de mejorar la calidad y confort de los edificios y evitar el deterioro, la comunidad científica ha prestado gran importancia a la predicción de ese comportamiento, sobre todo a partir de los años 30. En 1958-1959, Glaser avanzó un método simple para controlar la condensación intersticial en los muros fríos. No es hasta a partir de 1990 cuando la Agencia Internacional de la Energía (Hens, 1996), promoviendo proyectos de investigación, se desarrollaron de un gran número de modelos comerciales higratérmicos (calor, aire y humedad: modelos HAM realizados por Deschamps, Karagiozis, Krus o Künzle, así como la elaboración de catálogos de propiedades de los materiales en 14 países diferentes de los que obtener datos veraces y para su incorporación a los modelos. Entre ellos está el coeficiente de conductividad térmica, parámetro que influye grandemente la transmitancia térmica o valor-U. (Kumaran 1996), (Kumaran et al, 2002a)

En Europa en 2001, la Comisión Europea llevó a cabo el proyecto HAMSTAD que se basaba en el desarrollo de estándares de HAM. De este estudio se extrajeron mas información sobre la caracterización de los materiales.

Paralelamente a estos estudios de cálculos y simulaciones, cada vez más precisos, sigue siendo necesario obtener datos de la realidad que nos garanticen el comportamiento esperado. Se necesita eliminar las diferencias entre las aspiraciones del diseño y el comportamiento real final. Esto se hace más relevante en los climas con altos contenidos de humedad y precipitaciones, ya que afecta de forma significativa a las propiedades de los materiales y consecuentemente a su empeoramiento en el comportamiento térmico y energético.

Las diferentes referencias consultadas sobre el coeficiente de conductividad térmica λ relacionan los diferentes contenidos de humedad de los materiales con empeoramientos en el coeficiente y la variabilidad del valor también dependiendo de la temperatura.

Es un hecho que los altos contenidos de humedad se correlacionan con deterioros futuros. Y uno de ellos es el deterioro biológico: crecimientos de cianobacterias y algas en fachadas. En el ambiente higrotérmico del cerramiento, una humedad relativa ambiental por encima de 75% a 80% es crítica para el desarrollo de algas y cianobacterias en la superficie de los materiales de construcción. El rango de temperatura requerido está entre 0 a 50°C. A bajas temperaturas por debajo de 5°C, el crecimiento de algas y cianobacterias es más bajo, incluso con altas humedades relativas. Descubrimientos realizados por Garty (1991) sugieren que la colonización biológica no solamente causa desfiguración estética sino también causan un incremento de temperatura superficial en las áreas colonizadas. Como consecuencia, no sólo se inicia el **proceso de biodeterioro** del material de construcción sino también se altera la temperatura superficial.

Con toda esta evidencia antes descrita del empeoramiento de las prestaciones térmicas debido a las grandes cantidades de humedad y lluvia, la siguiente pregunta podría ser entonces cómo en el caso concreto de un cerramiento de la fachada ventilada se gestiona el posible ingreso y expulsión de agua y las diferencias de temperatura.

Las investigaciones canadienses en cerramientos con cámara ventilada destacan por analizar su comportamiento con situaciones ambientales muy húmedas.

La influencia del clima

En un estudio realizado por May (2009) en Gran Bretaña, se dispusieron tres tipos de cerramientos con un valor U aproximadamente similar. Los cerramientos estaban localizados en dos zonas climáticas diferentes, una en un clima moderado de Londres (clasificación climática Köppen Geiger Af) y otra en localizada en Swansea/Gales (clasificación climática Köppen Geiger Cfb) con clima severo con respecto a la lluvia dirigida por el viento. El estudio mostró el colapso del poliuretano por el incremento del contenido de humedad del cerramiento a lo largo del tiempo, alcanzando su punto crítico a los 2 años en Londres y tan sólo en 9 meses en el caso de Swansea. (En Mc Leod et al, 2013)

En el caso del **comportamiento higrotérmico de las fachadas con cámara** Finch y Straube (2007) indican que los mecanismos primarios de humedecimiento y secado en las fachada ventiladas de madera son la difusión de vapor y la ventilación trasera, ello combinado con el humedecimiento ocasional de las filtraciones de agua. La monitorización de un año de un cerramiento de madera tipo *rainscreen Wall* con una cámara de 19mm. Se puede observar en la figura II.52 los datos de temperatura y humedad obtenidos en la localización de Vancouver, (British Columbia) Canadá (misma clasificación Köppen Geiger-Csb que parte de Galicia y A Coruña). Se observa que la humedad relativa de la cámara normalmente es inferior a la ambiental a lo largo de todo el año. Se ve que en meses como noviembre, diciembre, enero, marzo e incluso abril tendencia al contenido de humedad del aire en la cámara superior al del exterior. Si se analiza la temperatura de la cámara se observa que es siempre superior.

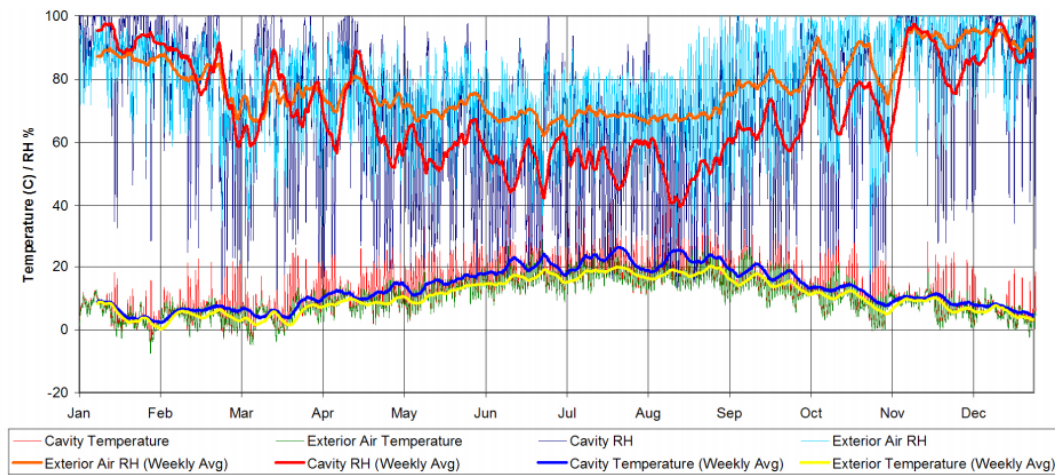


Figura II.52: Datos monitorizados de Temperatura y Humedad relativa del exterior y de la cámara de aire.
(Finch, Sc, et al., 2007)

Como se puede ver en la figura II.53, se hace un análisis de la presión de vapor en el cerramiento de un edificio para observar en la realidad cuáles son sus potenciales de secado y mojado. Los valores positivos entre abril y agosto facilitan el secado. Por el contrario, el resto del año se facilita el humedecimiento del cerramiento.

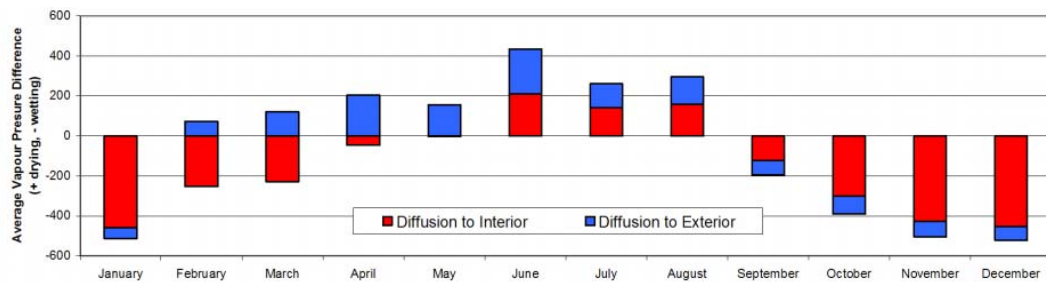


Figura II.53: Diferencia media de presión de vapor de agua. Valores positivos secado y valores negativos mojado (Finch, Sc, et al., 2007)

En el estudio realizado en Indianápolis (EE.UU) (Spinu, 2012) analiza la diferencia de presión de vapor por hora entre el espacio interior acondicionado y el medio ambiente exterior de un cerramiento. Durante los meses de invierno la dirección de difusión primaria es desde el interior hacia el exterior (presión de vapor interior es más alta que la presión de vapor exterior). Durante los meses de verano, la dirección de difusión primaria se invierte (presión de vapor exterior es superior a la presión de vapor de interiores). Hay unos pocos meses durante el año en que la difusión se produce en ambas direcciones, ya que las condiciones climáticas cambian de un día a la noche o el día a día.

Tariku et al. (2015) realiza una investigación experimental en Vancouver (British Columbia) Canadá sobre los ratios de mojado y secado de fachadas tipo *rainscreen* con cámara ventilada de 19mm, con tipo de barrera de vapor y sin barrera de vapor. Analiza la orientación sureste, donde es predominante la lluvia dirigida por viento y la orientación noroeste donde la radiación solar es mínima, así como la lluvia dirigida por viento. **El estudio concluye sugiriendo que en este tipo de climas, la difusión por vapor de agua es una carga de humedad crítica comparable al efecto que induce la lluvia dirigida por el viento.**

Marinosci et al. (2011) expone que el material colocado al exterior de la fachada ventilada no tiene en principio repercusión en el comportamiento térmico. Si bien, la humedad relativa y la temperatura de este material podría repercutir en la cámara de aire contigua. De hecho, se demuestra que la mayor insolación es en **materiales oscuros y unido a la orientación sur** (máxima exposición solar) **ofrece mayores tiros, por lo tanto mayores velocidades en la cámara de aire y como consecuencia mayor refrigeración.**

La cámara de aire

Pero qué pasa con una situación opuesta a la anteriormente descrita, cuando no existe tiro en la cámara o es insuficiente, además de tener una orientación Norte y clima lluvioso. Cómo es el comportamiento de la cámara de aire del sistema constructivo de fachada ventilada. Si se realiza una búsqueda bibliográfica, los autores no se ponen de acuerdo en relación a los beneficios o perjuicios de la cámara de aire en distintas orientaciones y en relación a su contribución a su mojado o secado.

Falk y Sandin (2013) los resultados demuestran que **el diseño de la cámara es de mayor importancia para el ratio de secado si el material adyacente a la cavidad está húmedo en toda su extensión.** Para estos casos, un color claro en la fachada, cámaras horizontales, y una pequeña profundidad de la cámara son factores adversos.

Falk et al. (2014) indica que se ha demostrado que una correcta asunción de **la tasa de ventilación de la cámara es de vital importancia para las simulaciones precisas de las condiciones de temperatura y humedad en las rainscreen walls y por lo tanto para las evaluaciones fiables del riesgo de daños por humedad y crecimiento de mohos.** Además expone que las fuerzas de ventilación de la cámara de aire son debidas a la diferencia de presión de viento entre las aberturas de la cámara y debidas al efecto chimenea. El estudio lo realiza con orientación sur en Lund (Suecia) simplificando por el día el modelo de ventilación es de efecto chimenea y por la noche el viento. Se muestra una alta correlación entre los valores de modelización y los experimentales.

(Nore, 2009) hace una revisión bibliográfica acerca del diseño de la cámara de aire. En ella hace referencia a autores que defienden que la ventilación es una medida sin ventajas ni perjuicios. En su argumento Nore indicaba que Christensen (1999) no encontró diferencias en las envolventes con cámara de aire y las que no la tienen. Además en el periodo de invierno es difícil que seque la fachada Norte, sin casi radiación directa. Refiriéndose a Johansson et al., (2000) no encontraron si la cámara de aire era necesaria, pero reconocía que la monitorización sólo había sido expuesta a 5,5 años, lo cual es un periodo relativamente corto de tiempo. (Andersen et al., 2002) y (Hansen et al. 2002) mostraron que un cerramiento de madera sin cámara de aire tiene un contenido de humedad ligeramente más bajo. Por el contrario sus investigaciones concluyeron que era necesaria una cámara detrás del material de cerramiento exterior.

Künzel, Karagiozis y Kehrler (2008) manifestaron que en Europa Central habían probado que la cámara de aire trabajaba igual que el cerramiento sin cámara y que incluso, sería mejor sin ventilación por la cara trasera. Sin embargo, los estudios de Norte América confirmaban los beneficios de la disposición de una ventilación por la cara interior del cerramiento exterior. Se

realizó una toma de datos en un edificio de la Universidad Estatal de Washington y se corroboraron los datos también con simulación. Los resultados demostraron que la ventilación trasera ayuda a mantener el material exterior seco. No obstante, el autor habla de inconvenientes de la cámara de aire. Puede disminuir el comportamiento térmico de la fachada ventilada debido al viento y a la acción de convección. También indica que hay un riesgo de condensación en la cámara durante las noches claras, especialmente cuando los cerramientos están bien aislados. Se recomienda utilizar la cámara en el cerramiento y ventilarla si se requiere una protección de humedad, aunque en los muros tipo *cavity wall*, la ventilación no es necesaria. Esta decisión, dice, debe ser tomada con la ayuda de la simulación del comportamiento higrotérmico y un modelo de ventilación. En este sentido autores como Burnett, Straube and Karagiozis (2005), Straube and Burnett (1995), Popp (1980), Bassett & McNeil (2006) han corroborado la hipótesis que la cámara ventilada tiene un efecto positivo en el secado del cerramiento.

TenWolde (1985) y Hansen (2002), sin embargo, han considerado en sus estudios que la cámara tiene un efecto negativo en el secado del cerramiento.

En España, Enedi (2013) apoya el argumento que, dependiendo de las condiciones ambientales, podría ser más recomendable tener una cámara estanca en ambientes más fríos y húmedos, frente a un clima más cálido en el que la fachada ventilada funcionaría mejor.

Aparicio-Fernández, Vivancos, Ferrer-Gisbert y Royo-Pastor (2014) realizan una monitorización durante un año de un edificio de oficinas con fachada ventilada en Valencia (España). Esta fachada consta de un panel tipo Alucobond al exterior de 4mm, una cámara de aire de 10cm, aislamiento de lana de roca y un panel de yeso al interior. Puede observarse en la figura II.56 esta fachada.

Se monitorizaron temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento en las cuatro orientaciones de fachada. Las mayores diferencias encontradas entre la temperatura de la cámara y del exterior fueron en la orientación Sur. Los resultados para la orientación Norte fueron menores de 2°C en Diciembre. La fachada Norte, en conjunto con la Oeste presenta las menores oscilaciones térmicas.



Figura II.54: Detalles de la fachada ventilada monitorizada. Gráfico de dispersión de las temperaturas de la cámara de aire medidas y simuladas en la fachada Norte durante cuatro meses (Aparicio-Fernández et al., 2014)

Se realizó también una simulación de los valores de temperatura de la cámara, obteniéndose en la fachada Norte el gráfico que a continuación se muestra.

Como resultado se indicó que durante la estación invernal la fachada ventilada puede mejorar el aislamiento térmico cuando la radiación solar elevada. Por el contrario, cuando la radiación solar y la temperatura exterior son bajas, el balance de energía en la fachada puede ser negativo. El estudio concluía que es importante prestar atención a la elección de los materiales en el diseño de la fachada y su superficie exterior expuesta a la radiación solar.

Nore (2009) concluye este estudio en Noruega que las fluctuaciones de contenido de humedad en el cerramiento ventilado analizado está más correlacionado con las variaciones en temperatura, radiación solar y velocidad del viento, que con las variaciones en precipitaciones, WDR y dirección del viento. La orientación de la fachada tiene la mayor influencia en la respuesta higrotérmica. Para una cámara ventilada, el mejor comportamiento, es la orientación oeste. La orientación este tiene el mejor comportamiento para un cerramiento no ventilado.

Existen otras localizaciones en Europa que tienen la misma clasificación climática que Galicia (clasificación de Köppen-Geiger Csb y Cfb) y que ya han analizado el comportamiento higrotérmico real y calculado de sus cerramientos, incluso los cerramientos más tradicionales de una sola hoja. Son estudios del ámbito anglosajón preocupados por la relación entre el comportamiento térmico y la humedad.

La influencia de la humedad en el flujo de calor y la transmitancia térmica

Siguiendo el argumento, a continuación se extraen estudios experimentales que han vinculado la humedad con la transmitancia térmica. Pisello et al, (2014) utiliza la construcción de dos tipos de cerramientos en dos edificios a escala real de dimensiones interiores 3.02mx3.02m para someterlos a monitorizaciones. Cada uno de los edificios tiene un cerramiento con distintos materiales y espesores pero con una misma transmitancia térmica (sup-sup)

Tipo	Composición (ext-int)	Espesores (m)	Conductividad térmica λ (W/mK)	Propiedades calculadas del cerramiento
TR-1	Fábrica de ladrillo	0.12	0.41	Transmitancia térmica (sup-sup): 0.29W/m2K Admitancia térmica: 0.164 W/m2K
	Cartón Yeso	0.01	0.16	
	Aislamiento de EPS	0.09	0.04	
	Fábrica de ladrillo	0.25	0.31	
	Enlucido de yeso	0.02	0.40	
TR-2	Yeso de alta densidad	0.02	0.50	Transmitancia térmica (sup-sup): 0.29W/m2K Admitancia térmica: 0.388 W/m2K
	Aislamiento de EPS	0.09	0.04	
	Fábrica de ladrillo	0.30	0.27	
	Enlucido de yeso	0.02	0.40	

Tabla II.27: Características de tipos de cerramientos ensayados. (Pisello et al, 2014)

Realizada una monitorización de temperaturas, humedades y flujos de calor, en sus conclusiones expone que el impacto del contenido de humedad es particularmente alto en el cerramiento menos transpirable (TR-2). Este mayor contenido de humedad se corresponde con el incremento de la medida in-situ de conductancia de muros y cubiertas y de la densidad de flujo de calor con respecto a valores teóricos calculados de conductancia. Como consecuencia, estos dos tipos de cerramientos no tienen el mismo valor de transmitancia térmica, como se suponía y se calculó inicialmente.

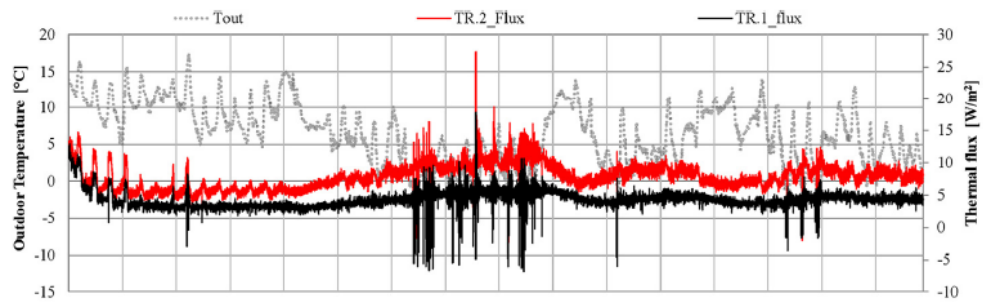


Figura II.55: Densidad de flujos de calor recogidos en las dos células de test TR-1, TR-2 desde el 13 de noviembre del 2012 hasta el 8 de enero del 2013 (Pisello, 2014)

En esta figura II.55, se observa con claridad que el valor de densidad de flujo de calor recogido en la monitorización y que se corresponde con la línea roja TR-2 es mayor que la densidad de flujo de calor de TR-1 en negro.

De hecho, el valor de transmitancia térmica (sup-sup) del muro, indicado en la gráfica, *es un 31% y un 46% con respecto al valor teórico de TR-1 y TR-2 respectivamente*. Los autores demuestran que frente a dos tipos de cerramientos con la misma transmitancia térmica, realizada la monitorización de la densidad de tasa de flujo de calor, se obtienen valores diferentes al teórico y además mayor valor de transmitancia térmica en que correlaciona con la menor transpirabilidad del cerramiento y más altas humedades relativas en el interior.

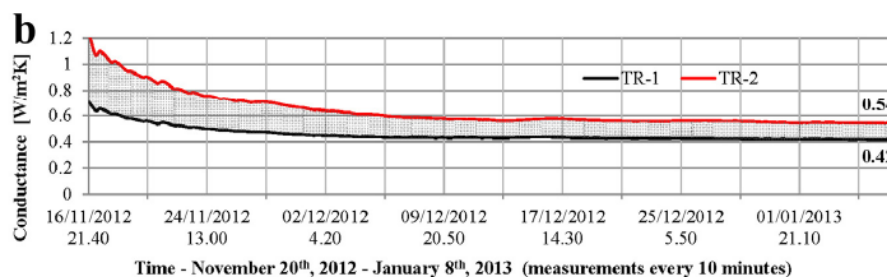


Figura II.56: Valor de transmitancia térmica de TR-1 y TR-2 obtenida de los datos in-situ de flujo de calor

Millán et al (2010). En este estudio se utilizaron programas de simulación higrotérmica avanzada para analizar conjuntamente la transferencia de calor y humedad, que posibilita correlacionar la variación de conductividad térmica con el contenido de humedad de los materiales a nivel teórico. El estudio concluye que estas variaciones afectan de forma determinante a las pérdidas energéticas del edificio a través de los cerramientos, **pudiendo suponer fácilmente incrementos superiores al 10%** para cerramientos típicos como el analizado (muro convencional de hormigón con aislamiento interior de poliuretano, cámara de aire y yeso).

Si es evidente una clara correlación entre la humedad de los materiales de construcción con el incremento del valor-U, y un empeoramiento de las prestaciones térmicas, la siguiente pregunta sería como afecta a los distintos materiales de construcción el incremento de la humedad, hasta incluso llegar a humedades relativas del 100%.

Uno de los materiales siempre utilizados en la envolvente y que garantizan las conductividades térmicas bajas y por lo tanto transmitancias térmicas también bajas son los aislamientos

térmicos. A continuación se extrae de diversos autores las diferencias de comportamiento térmico encontradas en los aislamientos cuando los contenidos de humedad aumentan.

La influencia de la humedad en la conductividad térmica de los materiales. El aislamiento térmico

Ashrae (1999) expone en su apartado de problemas de humedad en edificios y en particular el efecto de la humedad en tasa de flujo de calor, donde se indica que la humedad puede degradar el comportamiento térmico de la mayor parte de los materiales de aislamiento y hace referencia a diversos estudios de autores.

La relación entre el comportamiento térmico de un material de aislamiento y el contenido de humedad varían significativamente. Kyle y Desjarlais (1994) estimaron que la distribución de agua **reportaba una diferencia de hasta un 25% en el flujo de calor** en ciertos casos. Además Epstein y Putman (1977) y Larsson et al. (1977) mostraron que por ejemplo **un material de aislamiento con un 5% de contenido de humedad por volumen tenía de un 15 a un 25% mayor de transferencia de calor que cuando estaba seco.**

En definitiva, la resistencia a la humedad puede ser determinante para que la conductividad térmica se mantenga o varíe, aumentando, en este segundo caso degradándose. La razón estriba en que, como la ropa, desde el momento en que el aire o gas incluido en los poros del aislante es sustituido por agua, ésta tiene una "lambda" 25 veces mayor que la del aire. Si, además, se hiela, el hielo conduce unas 90 veces más el calor que el aire.

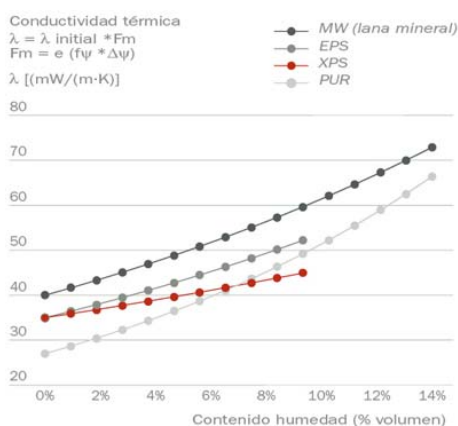


Figura II.57: Valor de conductividad térmica en función del contenido de humedad de los diferentes aislamientos térmicos según EN ISO 10456:2012. (Aipex, 2016)

El material dentro del cerramiento que ofrece la mayor barrera térmica, y por tanto, con valores de conductividad más bajos, es el aislamiento térmico. En todos los materiales aislantes, en mayor o menor medida, se produce un aumento de la conductividad con valores crecientes de absorción de agua. En la figura, se relaciona el contenido de humedad con la conductividad térmica, según los valores de diseño definidos en UNE EN ISO 10456.

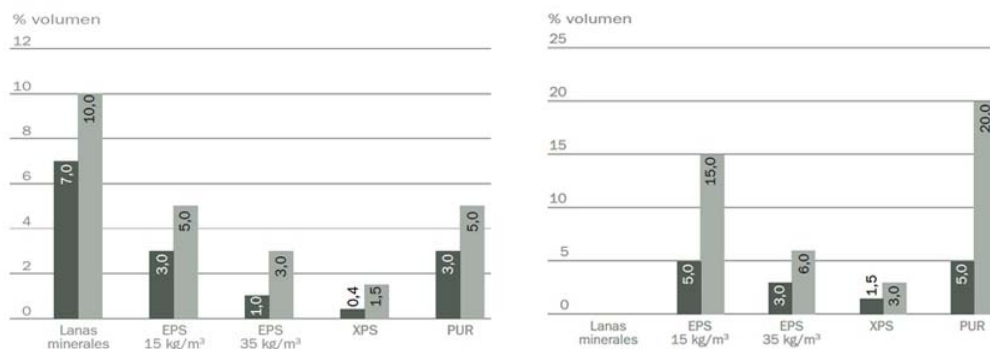


Figura II.58: Resultados en los ensayos de absorción de agua por inmersión [%] en volumen de contenido de agua y ensayo de absorción de agua por difusión de vapor [%] en volumen de agua (a largo plazo) UNE EN12088 (Aipex, 2016)

Los ensayos habituales de absorción de agua por inmersión, p.ej. el definido en el método de ensayo UNE EN 12087, dan una referencia del diverso comportamiento de los varios aislantes. Así, el PUR y el EPS, para el ensayo referenciado, se mueven en el intervalo de 2 a 5 % de absorción de agua en volumen y el XPS de 0.2 a 0.5 % (10 veces menos). De cualquier forma, el ensayo de absorción de agua por difusión de vapor es más duro que el de inmersión, para cualquier material, como se comprueba del hecho de que todos ellos dan mayores absorciones con este ensayo. Se observa que este ensayo es más duro que el de inmersión de agua, pues se obtienen, en general peores valores.

Lakatos (2012) muestra en el estudio el análisis de tres tipos de aislamientos: poliuretano, poliestireno extruido y paneles de fibra de madera. Se sometieron a una cámara climática que a una temperatura de 273°K fue elevada del 30% de RH hasta el 90% de RH. Las siguientes gráficas de sorción son el resultado de estos ensayos. En particular se extrae la curva de adsorción y desorción del poliuretano PUR, así como la relación del valor de la conductividad térmica con el incremento de contenido de humedad en el poliuretano. El incremento encontrado en este ensayo para estos contenidos de humedades bajas y en pequeños tiempos de mojado es de aproximadamente un 1%.

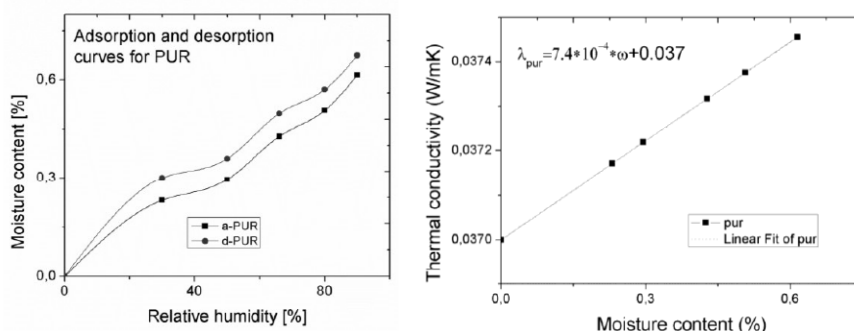


Figura II.59: Curva de adsorción y desorción del PUR y relación del contenido de humedad y la conductividad térmica del PUR (Lakatos, 2012)

Bien es cierto que este estudio deja sin analizar el comportamiento con humedades relativas ambientales de más del 90%, como se observan en la figura anterior.

Jerman y Černý (2012) exponen en su estudio que la conductividad térmica de todas las lanas minerales se incrementaron muy rápido con el incremento de contenido de humedad w . Las propiedades de hidrofilia y la hidrofobia no jugaron un papel importante a ese respecto. Las funciones $\lambda(w)$ fueron muy similares y la conductividad térmica en la saturación λ_{sat} , fue en un rango de 0,7 a 0,9 W/mK. El poliestireno expandido EPS presentó el mejor comportamiento entre los materiales analizados. Su λ_{sat} fue sólo de 0,05 W/mK lo cual fue un buen resultado.

Finch et al. (2007) estudian el comportamiento del aislamiento de espuma de poliuretano abierta y cerrada en el clima de Waterloo (Canadá) con orientación norte y sur. El cerramiento con poliuretano de célula abierta tenía resistencia al vapor insuficiente durante el invierno en el clima del sur de Ontario en condiciones interiores de 20 ° C y 50% RH para mantener contenidos de humedad por debajo del 20%, en particular de la orientación norte, tenía un contenido de humedad por encima de 30% para algunos meses. El cerramiento con poliuretano de célula cerrada, sin embargo, no tienen la resistencia suficiente para mantener el vapor de revestimiento contenidos de humedad por debajo de 20% para las mismas condiciones interiores.

Kumaran y Bomberg (1993) manifiestan que hay dos retos para la adecuada selección de materiales de aislamiento. Primero aspectos tales como el envejecimiento de las espumas llenas de gas, el efecto del aire sobre aislamientos de fibra de vidrio o efecto de la humedad en el rendimiento térmico de todos los aislamientos. El segundo es el desarrollo de métodos de evaluación que simulan el desempeño en campo de estos aislamientos.

Los autores exponen que el comportamiento real en las edificaciones de los diferentes aislamientos térmicos se ve afectado en un grado variable por las condiciones ambientales. Los materiales celulósicos pueden ser afectados por la humedad que absorben en condiciones de servicio. El aire que entra en plásticos celulares rellenos de gas diluye el agente de expansión y causa la reducción de su resistencia térmica con el tiempo. Los productos de fibra de vidrio de baja densidad son a menudo afectados por los flujos de aire. Estos cambios en el rendimiento en uso pueden variar dependiendo de la naturaleza del material y la forma de su instalación

En el Código de Construcción Sueco (SBN), está indicado que la conductividad térmica de diseño de los paneles de aislamiento de fibra preformada, calidad de clase 'A', varíe con la edad, el contenido de humedad y las condiciones normales de mano de obra.

Otros materiales utilizados en los cerramientos también son influenciados por los contenidos de humedad, como es el caso por ejemplo del granito. (Rojo, Alonso, 2002) indica en el estudio que el acabado superficial en una piedra puede influir en la capacidad de su superficie para absorber y retener agua y, por tanto, en su respuesta frente al deterioro. Bibliografía consultada indica que también los altos contenidos de humedad influyen en los elementos constructivos como el hormigón o el ladrillo.

De todo lo anteriormente expuesto, se puede realizar la siguiente pregunta de investigación para ser probada y que es la siguiente: En Galicia con clasificación climática Köppen Geiger Csb hay un empeoramiento (ascenso en valor) del valor de U_R en relación con otros climas y lugares.

Esta hipótesis plantea que la U obtenida de forma experimental a través de la recogida de medidas in-situ sería mayor que la U obtenida como resultado de diseño y cálculo simulado. Pero no sólo eso ya que la hipótesis se complementa con la idea que el clima y la situación ambiental del edificio, correlaciona con este comportamiento y, en particular, en situaciones ambientales como las de Galicia este clima empeora el comportamiento previsto de cálculo.

II.3.2 COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO

Continuando con la última parte, se hace ahora una descripción del estado de la cuestión en materia de energía para la fachada ventilada. El consumo de energía en la edificación es de suma importancia. La envolvente en los edificios tiene la posibilidad de minimizar ese consumo, en particular la pérdida de calor del ambiente interior. En la actualidad, y como se expuso anteriormente, para realizar cálculos energéticos en los edificios se utiliza el valor de transmitancia térmica o valor-U.

Las exigencias térmicas de la envolvente en la edificación se encuentran incorporadas en la transposición de la Directiva Europea 2010/31/UE del Parlamento Europeo y Del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios (EPBD). La última actualización de estos valores figura en el DB HE-1:2013 del C.T.E. para la provincia de A Coruña y es de $U=0,29\text{W/m}^2\text{ K}$ sustituyendo desde el año 2013 al valor de $U=0,73\text{W/m}^2\text{ K}$. Se observa que los niveles prestacionales se han incrementado considerablemente.

El valor-U actual supone un 39,7% del valor anterior exigido. Sin embargo, el hecho de exigir niveles tan restrictivos de transmitancia térmica, supone aproximarse al diseño con un análisis más detallado de los materiales de construcción.

Para la obtención del valor-U puede realizarse mediante un método de cálculo con el valor de conductividad térmica y del espesor del material. Este parámetro también se puede obtener de forma experimental, mediante la medición y con la instrumentación adecuada del flujo de calor y de la diferencia de temperaturas.

$$U = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{si} + R_{se} + R_c} \quad U = \frac{\sum_{j=1}^N q_j}{\sum_{j=1}^N (T_{i,j} - T_{a,j})} \quad \text{Unidades: [W/m}^2\text{K]}$$

Dónde:

e	[m]	Espesor del material
λ	[W/mK]	Conductividad térmica del material
R	[m ² K/W]	Resistencia térmica de radiación y convección
q	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor interior
T	[°C]	Temperatura

La localización climática de A Coruña tiene un gran contenido de humedad ambiental y de precipitaciones y por lo tanto con una energía vinculada a la humedad. Al flujo de calor ligado a la diferencia de temperatura antes descrito (Ley de Fourier), se le debe añadir también una

parte de flujo de calor ligado a la humedad y sus cambios de estado. Es, por tanto, que el parámetro de flujo de calor q obtenido de la experimentación pudiera ser diferente.

Para definir estos flujos, Treschel (1994) expone que a la transferencia de calor por conducción descrita por la Ley de Fourier, proporcional a la conductividad térmica en estado húmedo o seco y al gradiente de temperatura se le añade el transporte de calor causado por el agua en el flujo de calor, quedando la expresión:

$$q = -\lambda^* \frac{dT}{dx} + g_v H_v + g_l H_l \quad \text{Unidades: [W/m}^2\text{]}$$

Dónde:

q	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor
λ	[W/mK]	Conductividad térmica del material
T	[°C]	Temperatura
x	[m]	Espesor del material
g_v	[Kg/m ² s]	Densidad de flujo de masa (vapor de agua)
H_v	[J]	Entalpía de fase vapor
g_l	[Kg/m ² s]	Densidad de flujo de masa (humedad líquida)
H_l	[J]	Entalpía de fase líquida

El término segundo y tercero de la fórmula describe las partes de flujo de calor asociado con las entalpías de vapor y líquidas y a los efectos de evaporación y condensación. Estos flujos de los términos segundo y tercero no son proporcionales al gradiente de temperatura. Este autor argumenta que debido a estos cambios de estado el transporte de calor generado debe ser tenido en consideración en los cálculos ya que no es despreciable.

En el estudio de otros autores Rogass y Fischer (2000), y en concreto para el proceso de secado de los materiales de construcción, se expone un modelo de calor y humedad de una dimensión con dos condiciones de contorno. La primera no-isotérmica, significando que el proceso de secado del muro del cerramiento externo se realiza con diferentes temperaturas superficiales, similar a la situación real. La segunda condición isotérmica, donde las temperaturas superficiales son las mismas (como por ejemplo un material al interior).

En este modelo y en una condición de contorno no-isotérmica de una dimensión, ocurren los siguientes flujos de calor:

$$q = q_c + q_f + q_{Diff} + q_{lat} \quad \text{Unidades: [W/m}^2\text{]}$$

Dónde:

q	[W/m ²]	Densidad total de tasa de flujo de calor
-----	---------------------	--

q_c	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor por conducción
q_f	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor por el transporte de humedad por capilaridad
q_{diff}	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor de la difusión de vapor de agua
q_{lat}	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor latente debido a cambios de estado

La cantidad principal de transporte de calor debido a la conducción de calor de un material húmedo (Ley de Fourier) se define por:

$$q_c = \lambda(u) \frac{\partial t}{\partial x} \quad \text{Unidades: [W/m}^2\text{]}$$

Adicionalmente el transporte de calor es causado por el transporte de humedad. El transporte de agua por capilaridad da la siguiente densidad de flujo de calor:

$$q_f = c_w \rho_w a_w \frac{\partial u}{\partial x} \Delta t \quad \text{Unidades: [W/m}^2\text{]}$$

Dónde:

c_w	[s/Kg K]	Capacidad específica del agua w
ρ_w	[Kg/m ³]	Densidad de masa de agua
a_w	[m ² /s]	Difusividad a la humedad

Bajo circunstancias reales esta cantidad de transporte de calor es menos que un uno por ciento y por lo tanto despreciable. La densidad de flujo de calor debido a la difusión de vapor de agua es:

$$q_{Diff} = c_{p,v} \frac{a}{\mu R_v T} \frac{\partial p_v}{\partial x} \Delta t \quad \text{Unidades: [W/m}^2\text{]}$$

Dónde:

$c_{p,v}$	[J/Kg K]	Calor específico del vapor de agua
a	[m ² /s]	Coeficiente de difusión del vapor
μ	[-]	Coeficiente de resistencia a la difusión de vapor
R_v	[J/(Kg K)]	Constante de gas del vapor de agua
p_v	[Pa]	Presión parcial de vapor de agua

Esta cantidad es también mucho menos que un uno por ciento que la totalidad del calor por conducción.

Finalmente se tiene en consideración la densidad de flujo de calor latente que viene definido por:

$$q_{lat} = r_{pc}g \quad \text{Unidades: [W/m}^2\text{]}$$

Dónde:

r_{pc} [J/kg] Entalpía del cambio de fase específico (desorción)

g [Kg/m² s] Densidad de flujo de masa de agua desorbida

En la fórmula anterior, el calor latente es la demanda del flujo de calor para la desorción del agua durante el proceso de secado y por lo tanto con la pérdida actual de humedad de un material de construcción. Para el estado isotérmico sólo se considera el calor latente.

$$q = q_c + q_{lat} \quad \text{Unidades: [W/m}^2\text{]}$$

Deducida de esta fórmula, y en una condición de contorno no-isotérmica de una dimensión, se concluye que sólo se tiene en consideración el primer y último término, ya que el resto por su valor es despreciable.

En resumen hay energía debido a la radiación y conducción de los materiales y al movimiento de masa de agua y/o vapor de agua en el cerramiento. El esquema abajo expresado muestra estas dos principales fuentes de energía

Rogass y Fischer (2000), además de definir la densidad de tasa de flujo de calor, también definen un procedimiento por el que obtener la parte de flujo de calor latente que atraviesa un cerramiento. El proceso puede ser entendido en el esquema que abajo se representa. Es a través de la monitorización de los cerramientos con sensores de flujo de calor dispuestos tanto en el exterior (hfse) como en el interior (hfsi). Una vez obtenidos los valores de medidas, con su diferencia se deducirá el flujo de calor latente.

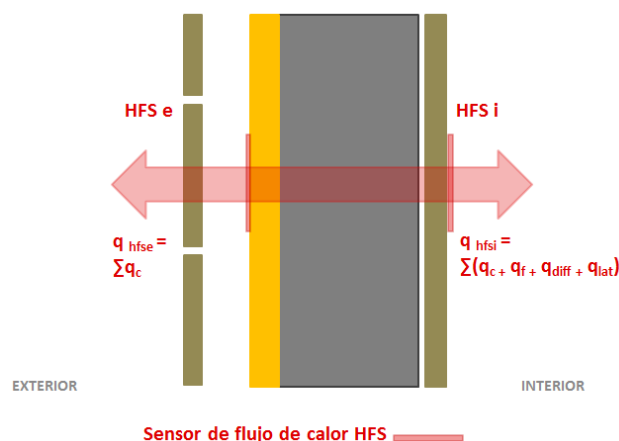


Figura II.60: Posición de los sensores de flujo de calor para la obtención del flujo de calor latente

Los autores demuestran mediante diferentes ensayos que el procedimiento puede ser utilizado. Para verificar que está midiendo la diferencia, correlaciona la densidad de flujo de

masa de secado con la diferencia obtenida de la densidad de flujo de calor entre el interior y el exterior.

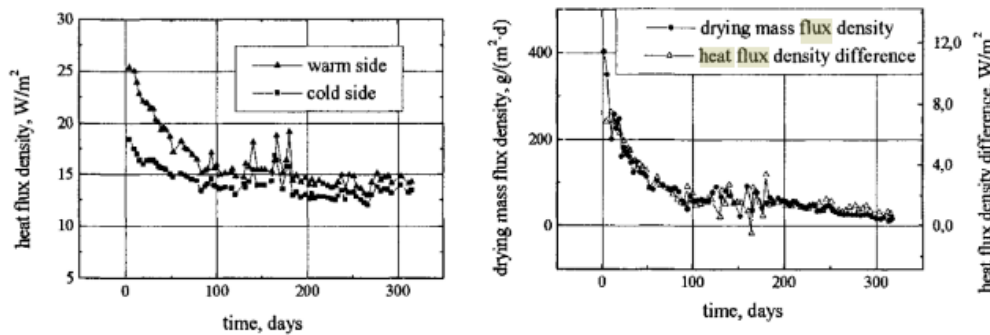


Figura II.61: Resultados de densidad de flujo de calor del lado caliente y del lado frío de un muro de hormigón poroso. Diferencia de la densidad de flujo de calor y densidad de flujo de masa de secado. (Rogass y Fisher, 2000)

Se ha advertido, pues, la importancia que los cambios de fase del agua tienen en el flujo de calor. La pregunta siguiente sería, cuáles serían los procesos en los que podría estar sucediendo esto. Treschel (1994) expone, mediante la figura II.62, los procesos de cambios de fase en la edificación que afectan a los contenidos de energía y cómo consecuencia al valor del calor latente. Si existe un clima con alto contenido hídrico, humedad y precipitaciones, como es el caso, gran cantidad de estos procesos pueden ocurrir.

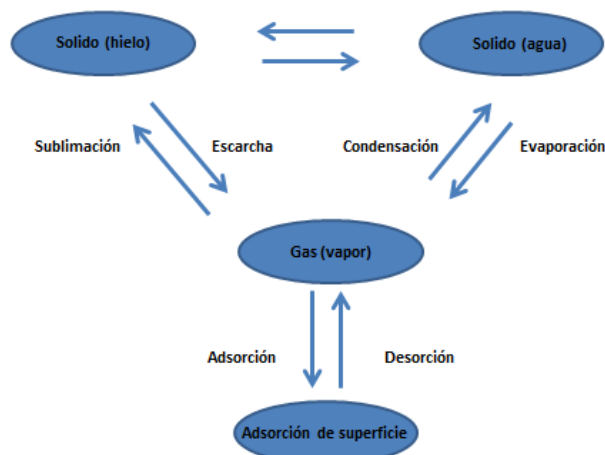


Figura II.62: Procesos llevados a cabo por la humedad que envuelven cambios de fase en la edificación (Treschel, 1995)

Sin embargo, la realidad en la construcción y en los cerramientos es más compleja. Treschel, sigue su explicación mediante cinco ejemplos de cómo los efectos de cambios de fase existen y especifica la contribución de la humedad y la transferencia de humedad a la transferencia de calor en el cerramiento.

- a) **Secado del contenido de humedad inicial.** El contenido de humedad va decreciendo. El calor latente de vaporización se coge del interior, el cual causa un incremento en el flujo de calor. La resistencia térmica puede deteriorarse.

- b) **Condensación sobre la superficie fría exterior.** El calor es emitido en la zona de condensación, pero es perdido en el ambiente exterior. Sucederá una elevación mínima de temperatura en la superficie exterior y parece que mejorará la resistencia térmica.
- c) **Flujo de humedad periódico entre las superficies en un elemento del cerramiento.** El calor se absorberá y se cederá alternativamente en la superficie interior y exterior. El efecto neto sobre varios periodos será despreciable.
- d) **Flujo de vapor en una dirección y flujo líquido en la otra.** Durante el invierno, la humedad puede ser transportada mediante difusión en fase vapor y la fase líquida por succión capilar. El calor latente de vaporización es cogido del interior mientras que el calor de condensación es perdido en el exterior. La resistencia térmica se reduce.
- e) **El mismo principio que en d).** La lluvia líquida golpea la fachada y es absorbida. Cuando el muro se seca otra vez, el calor latente de vaporización se coge parcialmente del interior. La resistencia térmica puede deteriorarse.

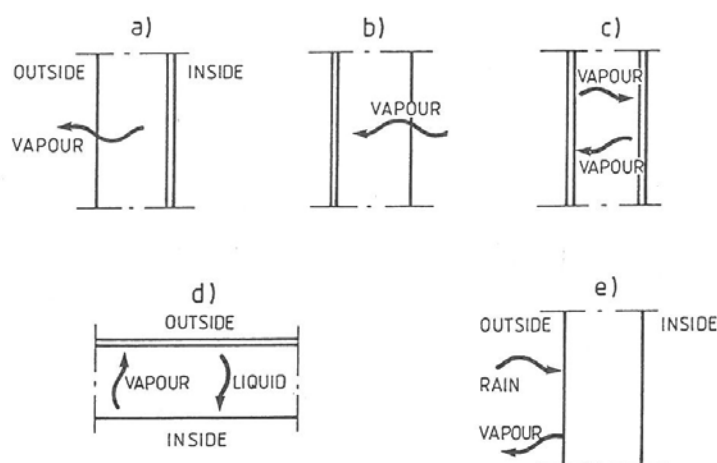


Figura II.63: Algunos ejemplos en los cuales los efectos de la humedad en la envolvente debe ser tenidos en cuenta (Treschel, 1995)

Todas estas situaciones expuestas por Treschel son particularmente habituales en los cerramientos sometidos al clima de una posible localización como A Coruña, que, como se dijo, hacen variar la transferencia de calor en el cerramiento. Y como consecuencia última modificando el valor-U.

En resumen, el valor de U puede ser definido por cálculo mediante el procedimiento de la norma. Se puede definir también mediante ensayo, pero aquí en la norma no se hace referencia alguna a la importancia de la entalpía o cambio de fase del agua que tiene la recogida de flujo de calor que atraviesa el cerramiento. Es, pues, que pueden aparecer diversas discrepancias. Veamos los estudios que se han realizado y si los investigadores muestran variaciones entre lo medido y lo calculado.

Enedi (2013) ensayaron dos tipos de muros bases existentes con fachada cerámica bajo cámara de aire. La primera ventilada y la segunda no ventilada. Este tipo de fachada fue

construida en una célula Passlink y testada en tres ciudades vascas: San Sebastián, Bilbao y Vitoria.

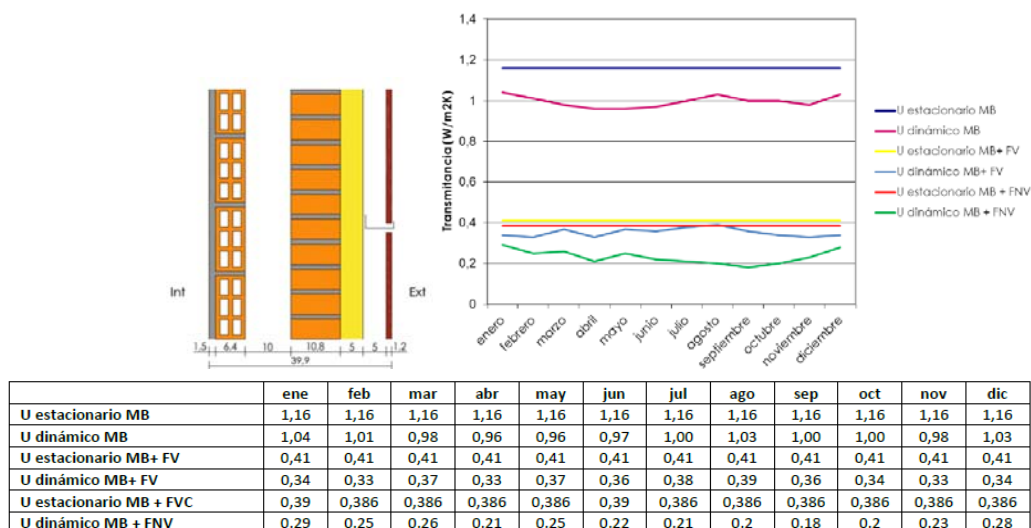


Figura II.64: Detalle del sistema de cerramiento ensayado y representación anual del valor U estacionario y dinámico para la fachada ventilada y no ventilada en San Sebastián. Transmitancias de la fachada ventilada y no ventilada (Enedi, 2013)

Si bien los resultados obtenidos en las tres localizaciones son similares, se ha extraído el caso de San Sebastián, clasificación Köppen Geiger Cfb. Para el cálculo de U se ha utilizado la simulación de características dinámicas bajo el método de diferencias finitas.

La figura anterior muestra la diferencia entre la U_T y la U_R . La U dinámica medida real supone un valor más reducido que la U estática teórica. **Estos valores han rondado a lo largo del año desde un 78% a un 88% de valor estático. Es decir, este estudio indica que hay una diferencia entre estos valores del 22 al 12%.**

El estudio además concluye indicando que la solución de rehabilitación para el verano sería la cámara ventilada. Por el contrario, en invierno la fachada no ventilada se comportaría mejor.

“...se puede deducir que la fachada ligero no ventilada es más recomendable para la zona climática del País Vasco. Las ventajas obtenidas con la fachada ligera ventilada en verano son menores que las ventajas obtenidas en invierno con la opción de cámara estanca. En caso de que resulte de interés emplear la fachada ventilada por el resto de sus ventajas, deberá aumentarse al menos 2 cm la capa de aislamiento térmico para compensar el comportamiento refrigerante durante el periodo invernal.” (Enedi, 2013)

Giancola et al. (2012) investigaron el comportamiento de una fachada ventilada real de forma experimental y numérica. La fachada estudiada se corresponde a la orientación sur y pertenece a un edificio localizado en Almería, clasificación Köppen Geiger BSk. A continuación puede verse la sección del cerramiento analizado.

Se recogieron durante un año datos experimentales de temperatura, flujos de calor y radiación solar incidente. En cuanto al comportamiento energético de la fachada y en particular a los flujos de calor que se recogieron en una habitación durante un día de verano y un día de invierno. En general las simulaciones predicen correctamente la evolución de los flujos de

calor. Tienden a predecir por debajo los flujos de calor por la noche y sobre predecir los flujos por la tarde. Esto puede ser debido a la simulación realizada en 2D. La desviación entre los datos predichos y los recogidos se indican aproximadamente menos del 10% o con una desviación del 10%.

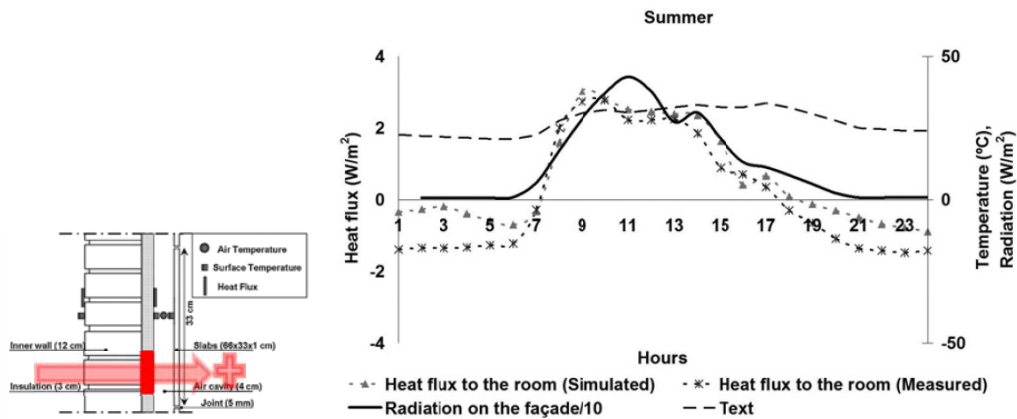


Figura II.65: Signo y posición del sensor de flujo de calor en rojo. Valores de temperatura, radiación y flujo de calor (medido y simulado) para un día de verano de la fachada ventilada al sur en Almería. (Adaptado de Giancola et al., 2012)

En las figuras recogidas del artículo se explica claramente tanto en las condiciones de verano como en las de invierno, como se comporta tanto de forma simulada como medida.

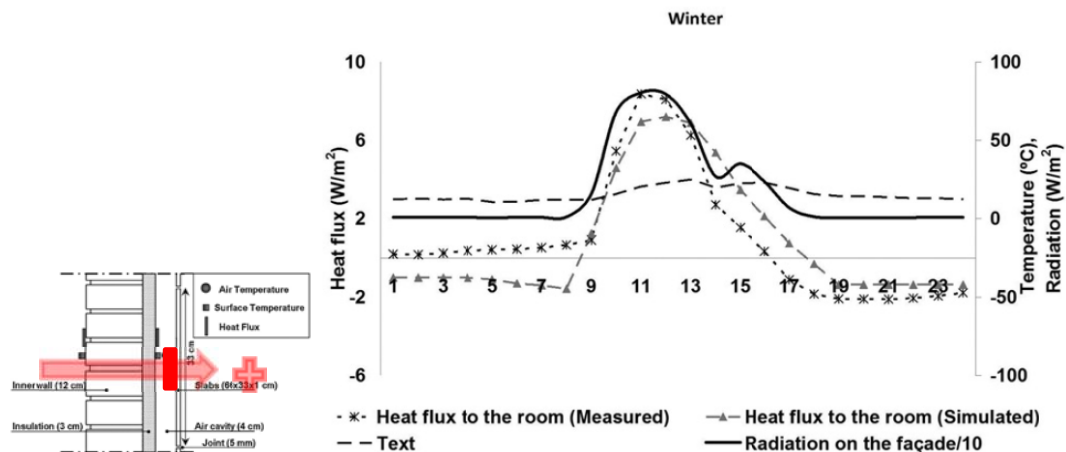


Figura II.66: Signo y posición del sensor de flujo de calor en rojo. Valores de temperaturas y flujos de calor (medido y simulado) de la fachada ventilada sur para un día de invierno en Almería. (Adaptado de Giancola et al., 2012)

Sugo, et al. (2005) muestran en las figuras II.67 y II.68 patrones de comportamiento

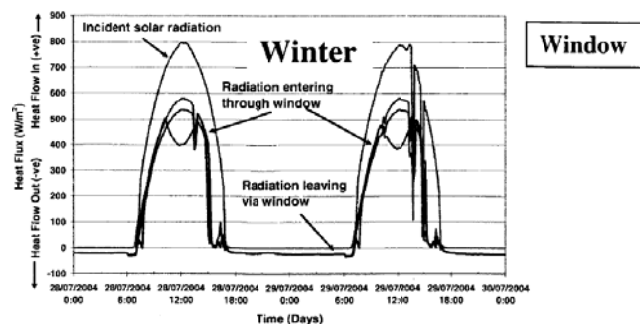


Figura II.67: Flujo de calor de una ventana en invierno (Sugo et al, 2005)

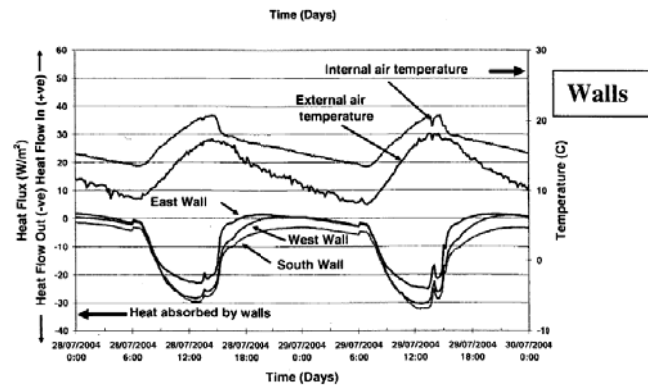


Figura II.68: Flujo de calor de un cerramiento vertical en invierno (Sugo et al, 2005)

Estas investigaciones realizadas en Newcastle, Australia con clasificación climática Köppen Geiger Cfa mostraron los patrones de comportamiento de una ventana y un cerramiento vertical. Puede verse

Cabeza et al. (2010) construyeron cuatro cubos con las fachadas típicas españolas situados en Lleida, clasificación Köppen Geiger BSk. Un cerramiento de doble hoja de ladrillo. El primer cubo sin aislamiento, otro con aislamiento de poliuretano, otro con poliestireno extruido y otro con lana mineral, todos los aislamientos con 5 cm de espesor, el mínimo requerido por el C.T.E. para ese lugar. Véase la figura siguiente.

Se extrajeron datos comparativos entre valores experimentales y valores teóricos de transmitancia térmica para el muro orientado al sur.

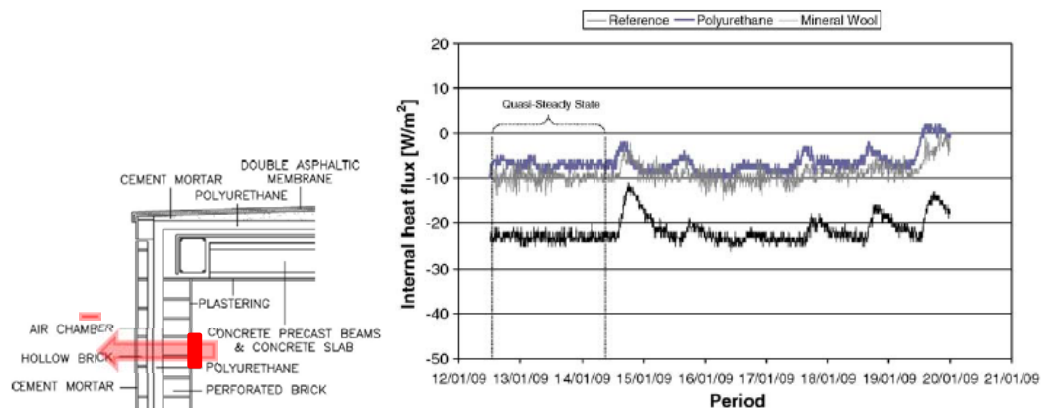


Figura II.69: Signo y posición del sensor del flujo de calor. Flujo de calor con tres tipos de soluciones: poliuretano, lana de vidrio y sin aislamiento en fachada sur. (Adaptado de Cabeza et al, 2010)

Las diferencias medias entre los datos experimentales y teóricos de la transmitancia son entre un 12 y un 14%, para enero y diciembre respectivamente. Se encontraron mayores desviaciones en el cubo de referencia, donde no se había instalado el aislamiento.

Biddulph et al. (2014) monitorizaron muros de 93 lugares de Inglaterra sin cámara de aire ni aislamiento. Recogieron las medidas según procedimientos establecidos en la ISO 9869:1994. Los sensores se colocaron en la fachada norte para excluir el impacto de la radiación solar de la superficie exterior y fuera de superficies internas de calor.

Los muros de ladrillo analizados fueron de aproximadamente 30 cm de espesor. **Las medidas in-situ sugieren que el comportamiento térmico de un muro es significativamente mejor (más del 37%) que el revelado por los cálculos**, los cuales pueden ser causa de diferentes tipos de estructura del muro o de las propiedades de los materiales, ninguno de los cuales puede ser identificado de forma visual.

Doran (2000). Se analizaron un total de 29 edificios de diferentes tipos de muros. Se observó que diferencia de la media de las mediciones realizadas de los edificios con cavidades parcialmente rellenas fueron entre U_s (medida y calculada) del 1,2. Los resultados sugieren que **los valores U medidos son aproximadamente un 20% mayores que los calculados según EN ISO 6946**

“...Los resultados de este proyecto presente, junto a otros proyectos pasados de Ward, indican que los procedimientos de cálculo existentes como EN ISO 6946:1997, usada con fines reglamentarios, pueden frecuentemente ofrecer unas pérdidas de calor reales en muros, en algunos casos de más del 30%...Es de destacar que la diferencia entre la U calculada y la U medida se correlaciona con el tipo de construcción con algunas diferencias significativas más que otras. Por ejemplo, los muros con cavidad de aire parcialmente rellena mostraron una diferencia más grande entre los valores calculados y los medidos que aquellos muros de estructura de madera...”

Baker (2013) realizó monitorizaciones de construcciones con muros de mampostería anteriores al 1919 en Inglaterra con clasificaciones Köppen Geiger Cfb y Dfb. Se analizaron también cuatro edificios posteriores al 1919 con cámara de aire.

En el apartado de comparación de resultados de 57 medidas in-situ con los valores calculados. (25) 44% fueron inferiores al rango calculado, (24) 42% son dentro del rango y (8) 14% fueron más elevadas que las calculadas

Generalmente los cálculos de U tratan de sobreestimar los valores de U con los resultados de las medidas in-situ. De este estudio se deducía que parece ser responsable la proporción tomada de mampuestos y mortero en los muros.

Para el cálculo de la resistencia térmica, otros investigadores han buscado diferentes alternativas de ensayos, incluso la realización de ensayos destructivos para su cálculo.

Como se ha reflejado anteriormente, todos los estudios hablan de diferencias de valores de transmitancia térmica calculada y recogida de las monitorizaciones in-situ en diferentes grados. Si bien, parece que los sistemas de muros de gran inercia de construcciones antiguas son los que más diferencias de valor-U se obtienen.

Pero la fachada ventilada tiene como particularidad la ventilación de la cámara de aire. En los estudios de fachada con cámara de aire que a continuación se han seleccionado, los autores tratan con detalle la contribución que hace la cámara de aire en cuanto a su flujo de aire para la mejora o empeoramiento térmico.

Marinosci (2011) realizó los estudios de monitorización y simulación de una fachada ventilada en la ciudad de San Mauro Pascoli (Italia), con clasificación Köppen Geiger Cfa. La siguiente

figura representa la densidad de flujo de calor recogido de dos tipos de fachada ventilada para un día de verano. Se reflejan los dos comportamientos y la relación en fase del flujo de calor con la temperatura exterior.

En este estudio también se ha estudiado como la orientación de la fachada ventilada influye en el valor de la densidad de flujo de calor.

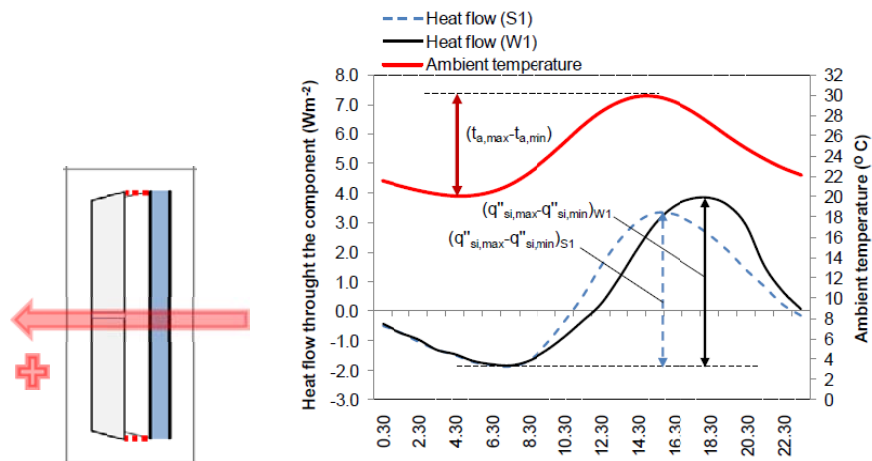


Figura II.70: Signo y posición del sensor del flujo de calor. Tendencia de la temperatura exterior y de la densidad de flujo de calor de dos cerramientos en condiciones de verano. (Adaptado de Marinosci, 2011)

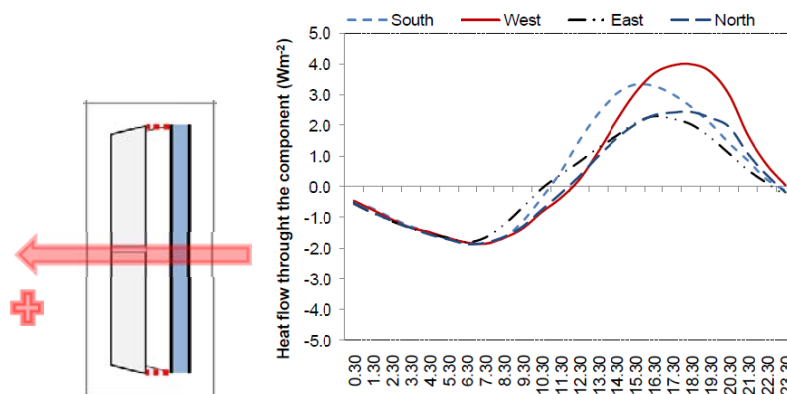


Figura II.71: Signo y posición del sensor del flujo de calor. Tendencia de la densidad de flujo de calor de la fachada ventilada en la superficie interior según diferentes orientaciones. (Adaptado de Marinosci, 2011)

Es la orientación Oeste la que posee los valores más altos de densidad de flujo de calor por la tarde. Sin embargo, los valores más altos de la mañana son obtenidos en la orientación Este.

Marinosci et al. (2014) cuantificaron la reducción del flujo de calor alrededor del muro interior debido a la descarga de entalpía ligada al flujo de aire de la cámara ventilada durante un día típico del verano. Los resultados experimentales destacaron que la reducción del flujo de calor se correlacionaba grandemente con el acabado exterior de la fachada ventilada, con la presencia de aberturas y rejillas de ventilación y del espesor de la cavidad de aire.

Balocco (2002) estudió los efectos debidos a los diferentes espesores de la cavidad ventilada tanto en invierno como en verano, así como la cámara de aire no ventilada. Estudió espesores

de la cámara de 7 a 35 cm pero con una altura de 14m y en Florencia con clasificación climática Köppen Geiger Cfa.

Para la situación invernal, la pérdida diaria total de energía para la fachada ventilada con 15 cm de espesor de la cámara y con los extremos cerrados es de 743kJ/m², con los extremos abiertos es de 1637 kJ/m², en comparación con 1201kJ/m² de un muro con una fachada no ventilada.

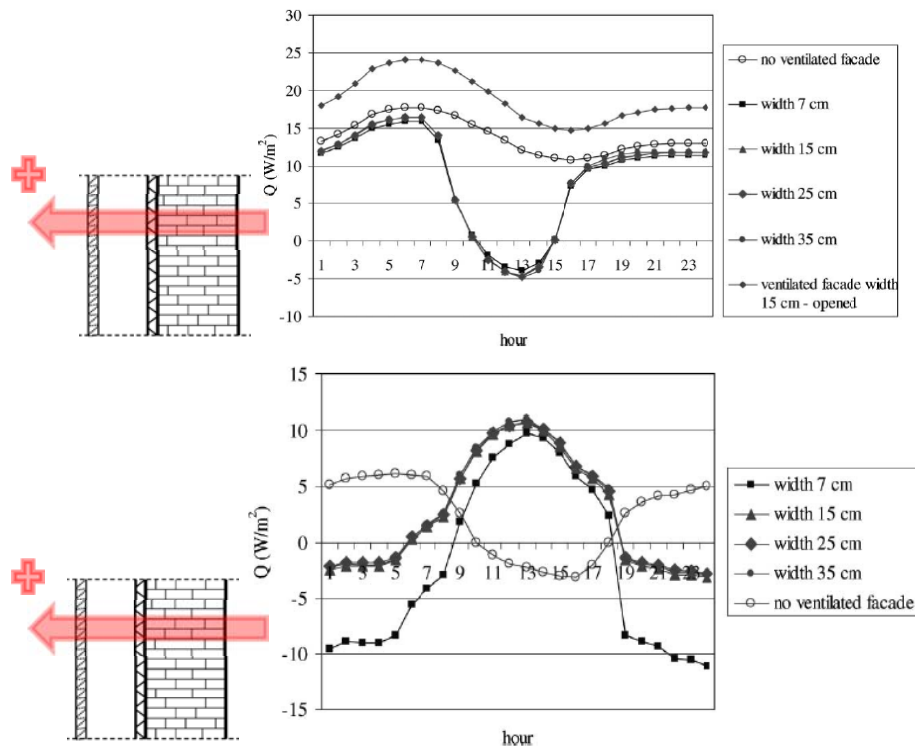


Figura II.72: Signo y posición del sensor del flujo de calor. Comparación del flujo de calor en W/m² para diferentes espesores de la cámara en un día de invierno y un día de verano en la fachada ventilada sur representada. (Adaptado de Balocco, 2002)

En estos gráficos se muestran como la transferencia del flujo de calor para diferentes espesores de cámara de aire son diferentes. El material de la hoja exterior es ladrillo macizo con aislamiento de poliestireno. La hoja exterior que separa la cavidad de aire es de granito de 3,5cm de espesor. Con una cámara de aire de 35 cm se produce una reducción de un 27,5% de sobrecalentamiento en verano debida a la radiación solar incidente, en contraposición de un 7% de reducción obtenida por un espesor de la cavidad de 7cm.

Se concluye que la tasa de flujo de aire en la cámara se incrementa con el espesor de la cámara y el incremento del stack effect, su efecto es máximo cuando el espesor de la cavidad es de 20 a 30cm. La geometría y la rugosidad de la cámara afecta a la uniformidad y la continuidad del flujo de calor, la variación de la temperatura superficial a lo largo de la cámara y la pérdida de presión.

Kairys y Karbauskaitė (2003) analizaron el flujo de calor transitorio a través del muro ligero vertical con y sin ventilación natural en la cavidad para un día seleccionado extremo.

Mostraron un decremento del 30% en el máximo flujo de calor de la superficie interior de un muro con una cavidad ventilada naturalmente comparada con una cavidad no ventilada.

Suárez et al. (2012) realizaron simulaciones del comportamiento energético de una fachada ventilada en Madrid en orientación Norte y Sur, clasificación climática Köppen Geiger Csa. Esta fachada está definida como se refleja en la figura II.73.

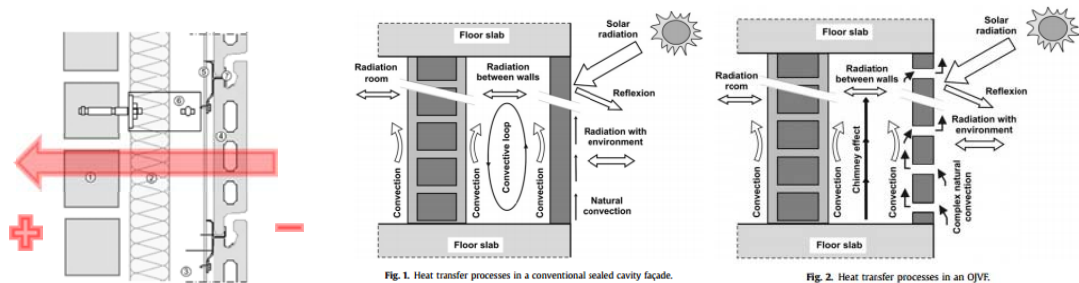


Figura II.73: Signo y posición del sensor del flujo de calor. Sección constructiva de las situaciones energéticas supuestas cámara sellada y ventilada (OJVF) (Adaptado de Suárez et al., 2012)

En la figura abajo indicada, se puede observar con claridad como el flujo de calor durante un día típico en invierno y verano, en la orientación sur (color teja) hay bastante diferencia entre la solución de la fachada con cámara ventilada en relación a la sellada. En línea de trazos, la solución sellada se comporta claramente peor. En el caso de la orientación norte no se aprecia diferencias significativas en la elección de fachada con cámara ventilada o sellada.

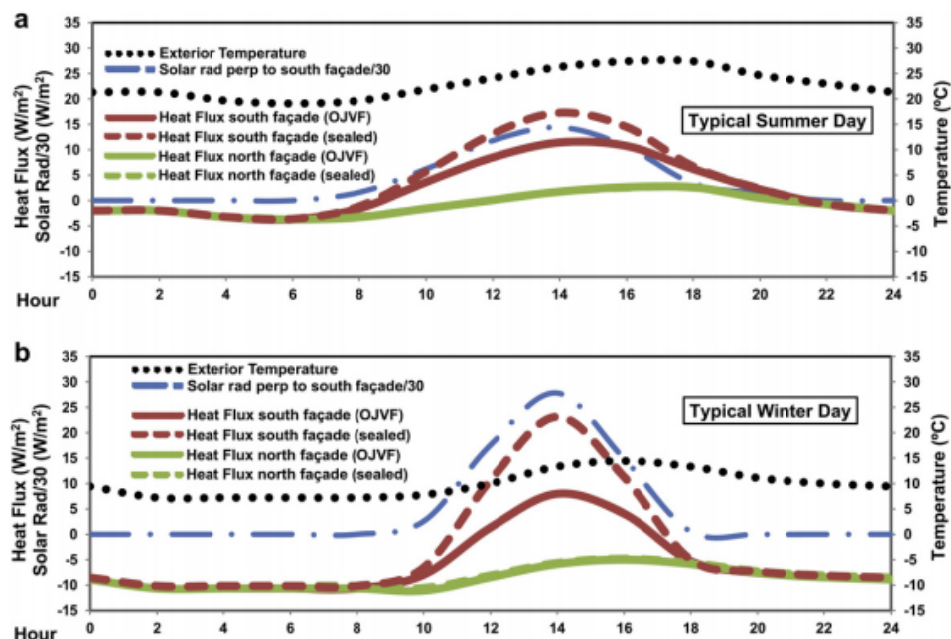


Figura II.74: Flujo de calor en la fachada norte y sur con cámara ventilada OJVF y sin ventilar en los meses de invierno y verano. (Suarez et al., 2012)

Esta tendencia antes descrita, también se refleja en el caso de las orientaciones este y oeste.

Como resultado, el autor indica que para la orientación Sur, la fachada con cavidad ventilada tiene un comportamiento energético mejor que la fachada con cavidad sellada durante el día,

reduciendo las ganancias de calor. Por la noche en la orientación sur y durante todo el día en la fachada norte, el flujo de calor a la vez que entra y sale es casi inexistente. Sin embargo, hay diferencias significativas de pérdidas de energía en la orientación norte, y en la sur por la noche, porque la temperatura exterior es más baja que la del interior. Estas pérdidas son más o menos las mismas en la fachada con cámara ventilada que sin ella.

En relación con la orientación norte, los dos cerramientos se comportan de forma similar, durante el día una pequeña cantidad de calor es transferida a la habitación y por la noche hay pequeñas pérdidas. En invierno, las pérdidas de energía son sustancialmente más altas y la fachada con cámara ventilada se comporta un poco peor sin radiación solar. La energía térmica requerida para el calentamiento nocturno en el lado sur y en la orientación norte todo el día, está entre 4 y 5% más alta que la fachada sin cámara ventilada.

En comparación con la energía total requerida anualmente, la fachada sin ventilación es sobre un 4% mejor para la orientación norte.

De todo lo expuesto anteriormente se puede plantear claramente la primera pregunta de investigación y que es si en el sistema constructivo de fachada ventilada hay más del 15% de variación entre el valor de la transmitancia térmica teórica-cálculo (U_T) y la transmitancia térmica real, obtenida de medidas in-situ (U_R)

II.4 SÍNTESIS CRÍTICA DEL CAPÍTULO II

Este capítulo II tuvo como objetivo **determinar el conocimiento existente y aplicar la normativa internacional en la prescripción y uso de la fachada ventilada de granito**. Se ha dado un recorrido del estado de la cuestión desde tres ámbitos (o partes del capítulo) que se han considerado interfieren en el comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada y que son los que a continuación se explican.

En la parte 1 del capítulo II cuyo objetivo era recopilar bibliográficamente variables predictores que se han advertido condicionantes del comportamiento higrotérmico, se expusieron las variables condicionantes del comportamiento de la fachada clasificadas en tres ámbitos, ambiental, material y constructivo arquitectónico. Con respecto al apartado ambiental, no sólo la temperatura sino la lluvia dirigida por el viento WDR y la humedad relativa son parámetros ambientales considerados relevantes en el riesgo de ingreso de agua en el cerramiento. Las propiedades materiales de absorción hídrica en la superficie exterior de la fachada y la curva de sorción se manifiestan relevantes en el comportamiento hídrico, así como su factor de resistencia a la difusión del vapor de agua para el secado. La conductividad térmica es también un parámetro característico determinante en el comportamiento térmico. En el ámbito constructivo-arquitectónico, además de las propiedades de los materiales, su disposición vinculada al valor de sus propiedades hídricas (baja resistencia al vapor de agua en el exterior y alta al interior) y térmicas (alta resistencia térmica al exterior y baja al interior) se observaron relevantes para un mejor comportamiento. Las deficiencias de ejecución son también relevantes.

En la parte 2 del capítulo II se analizó crítica y comparativamente las exigencias prestacionales de cálculo y diseño indicadas normativa a nivel nacional e internacional y en el ámbito térmico e hídrico de la envolvente de la edificación. Se realizó un breve análisis crítico del marco normativo nacional e internacional del comportamiento higrotérmico en la situación climática. Se expuso el procedimiento de ayuda para la definición y prescripción del sistema constructivo explicando las deficiencias encontradas.

En resumen, se observa deficiencias en el CTE para definir las cargas hídricas ambientales, no así en las normativas internacionales con mismo tipo de clasificación climática Köppen Geiger Csb y Cfb. No se observan unas exigencias objetivas y cuantificables para el óptimo comportamiento hídrico de la fachada ventilada. En el aspecto térmico, se observan dificultades a priori para calcular y/o medir la transmitancia térmica, en particular, al no considerar la energía de los cambios de fase del agua, o entalpía, advirtiéndose tan relevante en este tipo de climas como el flujo de calor debido a la conducción. Finalmente, también se exponen incoherencias en la interpretación del cerramiento para su óptimo comportamiento según sea hídrico o térmico al no existir tampoco un abordaje conjunto. Se han encontrado recomendaciones claras en otros países como Gran Bretaña, Alemania o Canadá en relación a los cerramientos en el ámbito hídrico.

Finalmente en la parte 3 del capítulo II se describió el estado de la cuestión de los estudios realizados del comportamiento higrotérmico y energético de los cerramientos. Se hizo mención expresa a diferentes estudios realizados recientemente sobre el comportamiento

higrotérmico y de densidad de flujo de calor de los cerramientos y en particular sobre la fachada ventilada. Estos estudios mostraron en general, que los resultados obtenidos de la monitorización in situ para el valor U fueron superiores a los obtenidos por cálculo. En algunos casos, las diferencias entre estos valores eran más del 20%, correlacionando con los climas más húmedos y materiales porosos. Los resultados analizados variaron según la orientación y el clima evaluado. Las referencias citadas en general apoyan la hipótesis o pregunta de investigación realizada y que es que existen más del 15% de diferencia entre el valor de transmitancia térmica real U y el calculado. Además se deduce que la humedad en todos sus aspectos, es relevante a la hora de elevar este valor y, como consecuencia, empeorar el comportamiento higrotérmico.

Recogida esta información, se procederá en el capítulo siguiente a plantear las preguntas e hipótesis de investigación así como la definición de un procedimiento para dar respuesta a esta problemática de si la fachada ventilada de granito, en la orientación norte y para el clima de A Coruña, se está comportando higrotérmicamente de forma adecuada y óptima.

II.4 CRITICAL SYNTHESIS OF CHAPTER II

This chapter II had as objective to **determine the existing knowledge and to apply the international framework in the prescription and use of an open-joint ventilated façade of granite**. A review of state of art has been made from three areas (or parts of the chapter) that have been considered to interfere in the hygrothermal behavior of the envelope and which are explained below.

In part 1 of chapter II whose objective was to collect bibliographically predictors that have been affected hygrothermal behavior. Factors were explained according to predetermining façade behavior. These factors were classified in three areas, environmental, material and architectural constructive. With respect to the environmental section, not only the temperature but wind driven rain and relative humidity are variables considered relevant in the risk of water entrance in the enclosure. Water absorption in the exterior surface and the sorption curve are relevant in materials water behavior, as well as its resistance factor to the diffusion of water vapor for drying. Thermal conductivity is also a characteristic parameter determinant in the thermal behavior. In the architectural constructive area, in addition to the materials properties, its disposition linked to the value of its water properties (low resistance to water vapor in the exterior and high to the interior) and thermal (high thermal resistance to the outside and low to Interior) were found to be relevant for better performance. Execution failures were also relevant.

In part 2 of chapter II critical comparative analysis and hygrothermal design requirements indicated at national and international framework of the envelope were analyzed. A brief critical analysis of national and international hygrothermal behavior regulation was made. Help procedure for the definition and prescription of the envelope was explained and describing deficiencies found.

In summary, lack in the C.T.E. to define extensively environmental moisture loads was found, but not in international regulations with the same type of climatic classification Köppen Geiger Csb and Cfb. There are no objective and quantifiable requirements for optimum moisture and water performance of an open-joint ventilated façade. In thermal aspects, a priori difficulties are observed to calculate and/or measure thermal transmittance, in particular, not considering the energy of water phase changes, or enthalpy, being seen as relevant in this type of climates as conductive heat flow. Finally, there are also inconsistencies in the interpretation of the enclosure for its optimal behavior. There is no joint approach whether it is moisture or thermal reason. In relation to enclosures in the moisture loads and prescriptions, clear recommendations have been found in other countries such as Great Britain, Germany or Canada.

Finally, part 3 of chapter II a state of art on the hygrothermal and energetic behavior were described. Explicit reference was made to several recent studies about hygrothermal behavior and density of heat flux and in particular on an open-joint ventilated façade. These studies showed, in general, that results obtained from in-situ monitoring for U value were different to those obtained by calculation. In some cases, differences between these values were more than 20%, correlating with more humid climates and porous materials. Results assessed

oscillated according to the orientation and the climate considered. References mentioned generally support the hypothesis or inquiry question made and that there is more than 15% difference between real and calculated thermal transmittance U value. In a brief, humidity in all its aspects is relevant in raising this value and, as a consequence, to worsen hygrothermal behavior.

After collecting this information, we will proceed in the next chapter to raise research questions and hypotheses. A procedure design to answer if an open-joint ventilated façade of granite is behaving hygrothermally optimally and adequately is presented.

III

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DEL TRABAJO

Definidas en el capítulo anterior las múltiples disciplinas que influyen en diferente grado el comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada, este capítulo III aborda cuáles son las preguntas planteadas y la forma en la que se va a tratar de dar la respuesta a las mismas.

Durante su recorrido se procederá a responder el **objetivo principal** del capítulo que es elegir y describir los procedimientos para la evaluación del comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada de granito orientada al norte en A Coruña. Son tres los **objetivos específicos** que se desarrollan de este objetivo principal indicados a continuación:

- . Se describe y explica el método para la obtención de datos in-situ mediante monitorización
- . Se describe y explica el método para realizar los análisis de sensibilidad mediante la simulación numérica
- . Finalmente se describe también el procedimiento del análisis de los datos y comparación de los mismos

El capítulo se estructura en tres apartados, los cuales argumentan estos objetivos específicos. El primer apartado expone la aproximación holística con la que se aborda el estudio. En él se da cuenta de las preguntas de investigación a responder.

El segundo apartado especifica los métodos utilizados para dar respuesta a las preguntas planteadas. En primer lugar una monitorización higrotérmica in situ del cerramiento de fachada ventilada de granito y otras dos para la obtención del valor de la transmitancia térmica. Seguidamente la forma de llevar a cabo los estudios de sensibilidad mediante el análisis numérico de simulación.

El tercer y último apartado expone a grandes rasgos como se realiza el tratamiento de datos, sobre todo, para la comparabilidad y el procedimiento de verificación. Finalmente el capítulo remata con un resumen de las conclusiones finales del capítulo.

La primera de las preguntas de investigación ya avanzada anteriormente en el capítulo anterior, supone que en el sistema constructivo de fachada ventilada de granito orientada al Norte en A Coruña hay una desviación entre el valor de la transmitancia térmica teórica-cálculo (U_t) y la transmitancia térmica real, obtenida de medidas in-situ (U_r).

La siguiente pregunta cuestiona si, para A Coruña Galicia con clima clasificado Köppen Geiger Csb hay un aumento del valor de transmitancia térmica U_r en relación con otros climas y lugares debido a la humedad. Se pregunta si acaso las transmitancias son mayores cuando la humedad es aproximadamente el 100% y qué tanto por ciento de aumento en las transmitancias térmicas calculadas de los cerramientos podría ser debido a tener en consideración la humedad.

La tercera y última hipótesis cuestiona si el parámetro de la humedad ambiental es uno de los más relevantes para determinar el comportamiento higrotérmico del cerramiento para este clima.

La monitorización in-situ es un método experimental, objetivo y cuantificable, de referencia empírica, que permite extraer datos fiables del objeto de la fachada ventilada. Se procede a realizar una monitorización higrotérmica y otra monitorización del valor de transmitancia térmica valor-U, siguiendo el procedimiento establecido en el estándar ISO 9869:2012.

Como segundo método para la verificación de la teoría física, se ha utilizado el análisis numérico de simulación higrotérmica mediante el procedimiento de estudios de sensibilidad. De estos estudios se extraen cuales serían los comportamientos esperables modificando variables, y obtener resultados de las variables que más influyen. Además se procede a obtener los valores de transmitancias térmicas estáticas en seco y al 80% y las transmitancias térmicas mensuales.

Los resultados obtenidos en la monitorización y los análisis de sensibilidad en la simulación pueden ser comparados e incorporarse a los datos que la comunidad científica ha obtenido.

Finalmente se ha utilizado la revisión bibliográfica para conocer el estado del arte y recoger los estudios que hasta la fecha se han realizado y que son relevantes en el ámbito de la transmitancia térmica y comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada con el fin de discutir los resultados alcanzados con la comunidad científica.



Figura III.1: Interrelación entre la obtención de resultados reales y la teoría física

Los resultados finales de la comparación son utilizados para discutir y sacar conclusiones que puedan ser de utilidad, definir con mayor precisión y advertir el comportamiento higrotérmico futuro de la fachada ventilada para este tipo de climas.

III.1 LA APROXIMACIÓN HOLÍSTICA

Para dar respuesta al problema planteado en la tesis se hace referencia a las diferentes disciplinas que intervienen. Asimismo se ha mantenido el enfoque general, es decir, la aproximación a los diferentes estados del conocimiento. En esta investigación la interdependencia entre disciplinas es de gran importancia. Las disciplinas involucradas aquí son la ciencia de los materiales, la ciencia de la construcción y la climatología. Esta concepción es denominada aproximación holística.

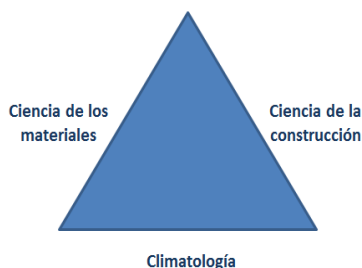


Figura III.2: Triangulo de disciplinas de conocimiento en el ámbito de la tesis

Durante el procedimiento de dar respuesta al problema, se han utilizado métodos deductivos e inductivos. El proceso deductivo de indagación se utiliza en las variables cuantitativas, que buscan causaciones. El proceso inductivo de indagación se ha utilizado en la determinación de las variables cualitativas. (Groat y Wang, 2002)

III.1.1 INTRODUCCIÓN

El clima de Galicia tiene unas características diferenciadas frente al resto de climas en la Península Ibérica. Su alta humedad relativa, la cantidad de precipitaciones, así como la reducida amplitud térmica, hacen distinguirse este clima del resto de España. El contexto normativo del Código Técnico de la Edificación actual parece no acercarse a la diversidad climática que ofrece este territorio, teniendo poco presente las precipitaciones y la humedad como parámetro de diseño en los cerramientos. Ello está demostrado en la baja definición de los cerramientos frente a la humedad de forma objetiva y cuantificable. Otros países han desarrollado procedimientos más exactos para la evaluación de ese riesgo. No obstante, el primer paso es conocer lo que verdaderamente está sucediendo en la realidad y realizar una recogida de datos. Conocer si las teorías físicas están prediciendo de la misma manera y si la comunidad científica posee resultados similares en relación a ese comportamiento. Las conclusiones obtenidas serán de gran ayuda para mejorar la prescripción nacional de los cerramientos de este tipo de clima gallego.

III.1.2 PREGUNTAS E HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

El estudio se inicia con el análisis del comportamiento higrotérmico y en particular de la densidad de tasa de flujo de calor existente en la realidad de un cerramiento con este clima gallego. Debido a la gran cantidad de agua en sus condiciones ambientales, **la primera pregunta de investigación planteada cuestiona que en el sistema constructivo de fachada**

ventilada hay una desviación entre el valor de la transmitancia térmica teórica, obtenida del cálculo (U_T) y la transmitancia térmica real, obtenida de medidas in-situ (U_R)

Esta cuestión nos lleva a formular la primera hipótesis: que en el sistema constructivo de fachada ventilada, las transmitancias calculadas teóricamente (establecido por la norma) y las obtenidas de ensayos experimentales in-situ, difieren. Esta hipótesis basa de antemano su fundamento, en primer lugar, en las **diferentes formas de realizar el cálculo teórico**. Si se suponen unas condiciones de temperatura constantes, se podrían hacer los cálculos bajo el estado estacionario. Pero la realidad significa tener una oscilación de temperatura a lo largo del día, que es denominado estado dinámico. Al realizar los cálculos bajo el estado dinámico, éste intenta reconstruir unas condiciones reales. Son diversos los modelos matemáticos que intentan acercar este comportamiento.

Una segunda argumentación supone que el **valor de la conductividad térmica (λ) de los materiales componentes está extraído bajo unas condiciones fijadas de temperatura y humedad ambiental además de las condiciones intrínsecas del material de densidad y porosidad fundamentalmente**. Si variamos estas condiciones variará el valor de este parámetro utilizado en los cálculos. Lo que se intenta transmitir es que no sabemos exactamente como se estará comportando en las condiciones ambientales reales el edificio.

Una tercera argumentación soporta la hipótesis que los cálculos para determinar la transmitancia térmica se basan en datos y **propiedades de los materiales** que no han sido determinados adecuadamente en los ensayos (diferencias entre los laboratorios que lo realicen), bien por la selección dentro de una base de datos anticuada y genérica o por no encontrar datos que se adecúen perfectamente al material realmente que se colocará.

La cuarta argumentación que soporta esta hipótesis se basa en que los cálculos de transmitancia térmica del cerramiento suponen **asimilar una resistencia térmica de valor fijo a la cámara de aire**, sin importar exactamente como puede comportarse realmente ese flujo de aire en las dimensiones de la cámara, sus características tamaño, velocidad, la humedad relativa de la cámara de aire supuesta y el vapor contenido, etc.

Para soportar los argumentos indicados anteriormente en esta hipótesis, se han recogido esta serie de artículos que comparan los datos experimentales del valor de U con los teóricos si bien no todos los recogidos son de este mismo tipo de sistema constructivo de fachada ventilada ni de la misma relación de ventilación en la cámara, ni los cálculos teóricos resueltos con los mismos métodos.

Todas estas argumentaciones reflejan que son muchos los parámetros que pueden ser considerados como los causantes de esa diferencia. Se hace necesario revisar con mayor exhaustividad los parámetros, en qué proporción intervienen y si son interdependientes. El conocimiento de todos estos parámetros, así como su nivel de interrelación con el mejor comportamiento será de gran interés para predecir y diseñar adecuadamente este sistema constructivo de fachada ventilada.

Para dar respuesta a la hipótesis se ha elegido un paño de fachada ventilada del edificio de departamentos de Arquitectura, orientado al Norte, como banco de pruebas, para este estudio

de un aplacado de granito ventilado y considerado realizar el siguiente procedimiento de obtención del **cálculo de transmitancia térmica mensual** mediante el programa de software de análisis numérico Wufi Pro 5.3. También se realiza el **cálculo de transmitancia térmica estática** mediante el programa Wufi Pro 5.3 aplicando la norma UNE-EN ISO 6946:2012 *Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo*. Finalmente una **monitorización del valor de densidad de tasa de flujo de calor en el cerramiento de la fachada ventilada**. Se sigue el procedimiento descrito para una inspección termográfica en la norma EN 13187:2000 *Prestaciones térmicas de edificios. Detección cualitativa de irregularidades en cerramientos de edificios. Método de infrarrojos*. La recogida de los datos de la densidad de tasa de flujo de calor se han realizado siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ISO 9869-1:2014 *“Thermal Insulation-Building Elements- In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance”*

Se realizará una comparativa de los valores obtenidos de todos los elementos de la muestra en los ensayos realizados.

La segunda hipótesis a verificar establece que en A Coruña, Galicia (clasificación climática Köppen Geiger Csb) hay un aumento del valor de U_R en relación con otros climas y lugares debido a la humedad.

Esta hipótesis plantea que la U obtenida de forma experimental a través de la recogida de medidas in-situ sería mayor que la U obtenida como resultado de diseño y cálculo simulado. Pero no sólo eso ya que la hipótesis se complementa con la idea que el clima y la situación ambiental del edificio, correlaciona con este comportamiento y, en particular, en situaciones ambientales como las de Galicia este clima empeora el comportamiento previsto de cálculo.

En particular, se plantea si las transmitancias térmicas son mayores cuando la humedad relativa se acerca al 100%

El procedimiento seguido para verificar esta hipótesis ha sido la selección de un modelo de humedad y calor (HM) más óptimo, eligiendo el programa de análisis numérico de simulación WUFI Pro 5.3 para su utilización. Se procederán a realizar cálculos de simulación con dicho programa, obteniendo unos valores de humedad relativa que puedan correlacionar con el valor de transmitancia térmica. Se recogerán datos de monitorización y podrán ser también comparados y correlacionados.

La última hipótesis establece que si el parámetro de humedad ambiental es uno de los más relevantes para determinar el comportamiento higrotérmico del cerramiento para este clima.

Para verificar la última hipótesis, y tratar de seleccionar las variables que se consideren más relevantes e influyentes en el comportamiento higrotérmico de este tipo de cerramiento, obtenidas de la revisión bibliográfica, se ha utilizado la estadística descriptiva y el análisis y ecuación de regresión lineal. La obtención de una ponderación permitirá predecir con mayor claridad el comportamiento futuro.

Para dar respuesta a estas preguntas de la tesis y verificar las hipótesis planteadas se mostrarán en los apartados siguientes los métodos elegidos para completar la investigación.

III.2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Este segundo apartado del capítulo tercero trata de dar respuesta a los dos objetivos específicos ya indicados. Tal y como se explicó anteriormente, el diseño de investigación se ha estructurado en tres partes: primero se expone un método experimental de monitorización higrotérmica, seguidamente el método experimental de monitorización del flujo de calor con el objetivo de obtención de la transmitancia térmica y finalmente estudios de sensibilidad a partir del análisis numérico de la simulación. Cada uno de estos sub-métodos elegidos son los que serán expuestos con detalle.

III.2.1 MONITORIZACIÓN HIGROTÉRMICA

"If you cannot measure it, you cannot improve it"

Sir William Thomson, Lord Kelvin

Durante los años 2008 y 2009, participé como técnico para el desarrollo de un proyecto de investigación de la Xunta de Galicia concedido a la empresa Proyectos y Estudios de Galicia SL y desarrollado junto a las Universidades de A Coruña, Alicante y Santiago de Compostela (PGIDIT06CCP009E). El trabajo fue realizado dentro de un proyecto con una finalidad de mayor envergadura: la minimización de la colonización biológica de las cianobacterias y algas en los aplacados de granito de este tipo de fachadas. Entre otras acciones se necesitaba realizar el control higrotérmico de una fachada ventilada que poseía colonización biológica ya que no se tenían datos de monitorizaciones de temperatura y humedad realizadas en Galicia. Para ello se eligió un edificio accesible, el edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña.

En concreto, y en este ámbito, mi trabajo se basó en el apoyo en el diseño, puesta en obra, toma y recogida de datos del comportamiento higrotérmico de esta fachada ventilada, así como la generación del informe. Estos datos se recogieron con sensores de temperatura y humedad ambientales y superficiales así como se utilizó la cámara termográfica para mediciones superficiales. Los resultados confirmaron el característico comportamiento amortiguador de la fachada ventilada y desvelaron algunos comportamientos particulares de esa fachada no esperados que en este caso no son motivo de su exposición.

La unidad de análisis seleccionada para la recogida de los datos de mediciones de temperatura y humedad es una pequeña parte de la fachada ventilada del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña. El edificio está localizado en la latitud: 43.32°N, longitud:-8.41 °W y altitud 100m. Se puede observar una vista aérea del edificio en la figura III.4 mostrada a continuación.



Figura III.3: Plano de localización del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña. Universidad de A Coruña. En recuadro rojo el edificio.

Fue seleccionada parte de una fachada con orientación norte, exactamente orientación nornoroeste. La elección del edificio vino motivada por la facilidad del acceso interior e incluso montaje y desmontaje de la misma para la disposición de los aparatos de medida. La elección de esa orientación ha sido debida a la no interferencia de la insolación directa sobre la fachada, aislando más si caben parámetros que pudiesen complejizar la interpretación de los datos recogidos.

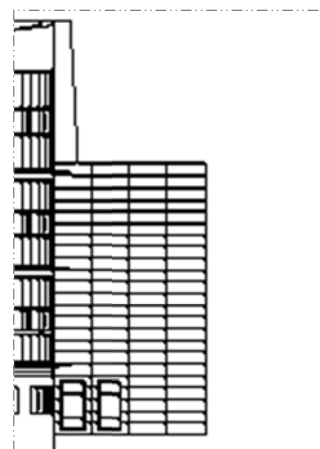


Figura III.4: Foto y plano de la fachada ventilada de análisis. En rojo la localización del dispositivo de medida en la cámara de aire y en el exterior

En concreto, la fachada se divide en cuatro columnas de aplacados de granito silvestre de 3 cm de espesor de dimensiones 119,5x41,8 cm y 23 aplacados de altura. Puede verse con detalle en la figura III.5

Estos aplacados tienen mecanizados los cantos, es decir una ranura, para permitir su adecuada sujeción. El sistema de subestructura colocado es de la empresa fabricante Proesga S.L. denominado ST-2001.

El método y la instrumentación. La instrumentación fija

Para la medición de la temperatura y humedad ambiental se seleccionaron unos termistores registradores de datos tipo “Tinytag” encargados de recoger estos valores.

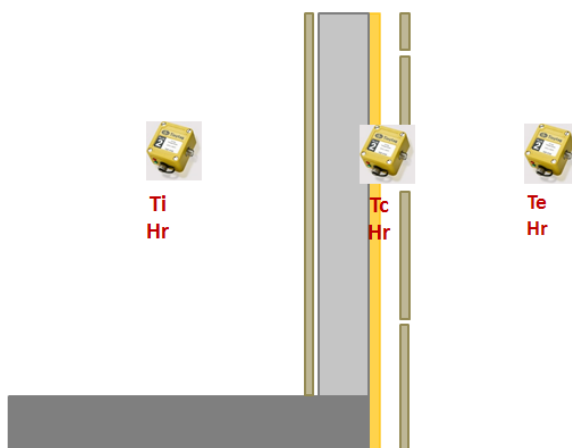


Figura III.5: Posición de los sensores exterior-cámara e interior de la fachada ventilada norte del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura en la primera monitorización 2008-2009

En cuanto a la posición, se seleccionaron diferentes puntos para situar estos aparatos, en las condiciones del exterior, del interior del edificio y de la cámara de aire de la fachada ventilada. El termistor que toma datos del exterior (temperatura y humedad) se dispuso colgado de la barandilla a unos 4,50 m del suelo. El sensor interior se dispuso a un metro del nivel del forjado, aproximadamente a unos 4,50 m del nivel del suelo exterior. A esa misma altura, otro termistor se colocó empotrado en el aislamiento térmico (poliuretano proyectado) y dando frente a la cámara ventilada. En estas disposiciones se realizarían las mediciones de la temperatura ambiental exterior, de la cámara e interior así como también la de la humedad relativa durante un año.

Con estos datos se ha considerado relevante deducir también los valores de presión de vapor de forma indirecta, utilizando tablas. Este parámetro se considera relevante pues contribuye en un 30% en el proceso de mojado del cerramiento y contribuye en un 70% en el proceso de secado del cerramiento.

Adquisición de datos

Los termistores tienen la capacidad de almacenar y registrar datos como máximo de 16307 mediciones. Se ha programado para que estas mediciones de temperatura y humedad relativa en las tres disposiciones fuesen realizadas cada 30 minutos.

Para la obtención de los datos indirectos de presión de vapor se han utilizado las tablas de presión de vapor de saturación de la norma alemana DIN 4108-3 y las fórmulas que los relacionan.

III.2.2 MONITORIZACIÓN DE LA DENSIDAD DE TASA DE FLUJO DE CALOR

El segundo objetivo específico, trataba de definir el procedimiento para la obtención del valor de transmitancia térmica. Este valor del cerramiento es necesario para cumplir los requerimientos normativos de tipo térmico. Se advierte siempre de suma importancia, ya que es también utilizado para realizar los cálculos de comportamiento energético y las emisiones de carbón del edificio.

La normativa UNE EN ISO 6946: 2012 *Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo* expone el procedimiento para su cálculo. Existen ciertos parámetros que deben ser conocidos previamente como es la conductividad térmica λ y del espesor de los materiales que componen el cerramiento. Los datos de conductividad térmica de materiales son recogidos en guías, en bibliografía técnica, también en el estándar internacional UNE EN ISO 10456:2012. Además este valor también puede ser medido en laboratorio.

Pero el valor de transmitancia térmica puede ser obtenido mediante de forma empírica. Existen principalmente dos métodos para su obtención.

Método basado en la temperatura. El flujo de calor se determina aproximadamente con la medición de la temperatura interior T_i y la temperatura superficial del cerramiento T_{sc} . La gran desventaja de este método está en la elección de sensores de alta precisión. El valor de R_{si} se es parcialmente estimado, ya que se deriva de valores estandarizados de los elementos de la edificación y normalmente es 0,13 m²K/W. La fórmula de cálculo para este método es la siguiente:

$$q = \frac{T_i - T_{sc}}{R_{si}}$$

Dónde:

q	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor
T_i	[°C]	Temperatura interior
T_{sc}	[°C]	Temperatura superficial interior del cerramiento
R_{si}	[m ² K/W]	Resistencia superficial interior

Método basado en el flujo de calor. En el caso de este método, todos los valores necesarios para el cálculo del valor U se determinan directamente con medidas in situ y aplicando la fórmula siguiente:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})}$$

Dónde:

U	[W/m ² K]	Transmitancia térmica
q	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor
T_i	[°C]	Temperatura interior
T_e	[°C]	Temperatura exterior

Con sensores de temperatura interior y temperatura exterior T_i y T_e se determinan los valores del denominador. Para el valor de q se utiliza los sensores de densidad de tasa de flujo de calor en la cara interior del cerramiento a analizar. Todos los valores son extraídos de la experimentación.

En el caso del método para la recogida de los valores de densidad de tasa de flujo de calor, el procedimiento es recogido en el estándar UNE EN ISO 9869:2014 *Aislamiento térmico-elementos de construcción. Medición in-situ de la resistencia térmica y de la transmitancia térmica. Parte 1: Método del medidor de la densidad de tasa de flujo de calor* y es el que se decide utilizar en esta tesis doctoral. El motivo de la utilización de este procedimiento ha sido principalmente su uso por los técnicos, por la numerosa bibliografía encontrada y como referencia indicada en las exigencias normativas para la obtención de forma empírica.

Para su aplicación, el cerramiento elegido a monitorizar es una fachada ventilada de granito y orientada al Norte, sistema que se ha venido utilizando bastante en Galicia durante los años precedentes. Si bien el concepto de rainscreen nacía en países con climas lluviosos y sin altas radiaciones como Canadá o Noruega y parecidos a las condiciones climáticas de A Coruña, lo cierto es que este sistema constructivo, en la actualidad, está muy analizado para climas mediterráneos, con radiaciones altas, donde la cámara ventilada funciona como chimenea renovando el aire y refrigerando por convección. Los estudios e investigaciones indicadas en el capítulo anterior hacen referencia a ello.

Mucha literatura térmica coincide en observar el empeoramiento de la conductividad térmica con la humedad en los materiales, y como consecuencia con la transmitancia térmica “*valor-U*”. Este diseño de ensayo quiere responder con mayor claridad a cuál es el comportamiento higrotérmico de este tipo de sistema de cerramiento cuando está sometido al clima de Galicia, y en particular, cuál sería la cuantificación de la humedad.

Además de seguir el procedimiento de la ISO 9869:2014 para la obtención de la transmitancia térmica, y para conocer el posible empeoramiento energético y el proceso de secado del cerramiento, esta tesis sigue el procedimiento presentado por Rogass y Fischer, (2000)

Este procedimiento **permite conocer el comportamiento de secado por las medidas recogidas de los sensores de densidad de tasa de flujo de calor**. Se coloca un sensor en el lado caliente que da las densidades de tasa de flujo de calor debidas a la conducción, conducción por humedad debida al transporte de agua por capilaridad y a la difusión de vapor de agua y finalmente la densidad de flujo de calor latente debido a la desorción del agua dentro del muro, (véase capítulo II). El sensor en el lado frío sólo mide las primeras tres contribuciones.

Por lo tanto la densidad de tasa de flujo de calor latente es la diferencia del valor de la densidad de tasa del flujo de calor entre el lado caliente y el lado frío. El cero significa el estadio final en el proceso de secado.

El procedimiento seguido para la realización de la monitorización ha sido lo indicado en la UNE EN ISO 9869:2014 que consta fundamentalmente de las siguientes etapas o fases:

- . Objeto de estudio o cerramiento a monitorizar
- . Localización de la monitorización
- . Elección de los dispositivos de medida, disposición y su calibración
- . Forma y adquisición de datos

A continuación se describe cada una de estas fases y se explican las decisiones tomadas para el diseño final completo de la monitorización.

. Objeto de estudio o cerramiento a monitorizar

La elección del edificio, y en particular de la fachada, ha sido la misma que previamente se había realizado la monitorización higrotérmica anual, es decir, la parte de la fachada norte del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña. (Véase apartado anterior). Se mantiene la monitorización en la orientación norte ya que tiene ausencia de radiación solar incidente sobre la fachada ventilada. Esta situación trata de evitar el movimiento de aire de efecto chimenea en la cámara ventilada de la fachada debido a las variaciones térmicas según la altura. Además permite que permanezca un mayor contenido de humedad en su entorno.

El que sea un edificio de una institución pública, la comodidad de acceso a un espacio interior controlado y también la facilidad de la puesta en funcionamiento de la monitorización han sido motivos suficientes que han pesado en la elección de este cerramiento del edificio.

. Localización de la monitorización

Antes de colocar los sensores de densidad de tasa de flujo de calor, se procedió a realizar un análisis para determinar la localización más adecuada de los sensores en esa pared norte. La norma establece el uso de la termografía para asegurar que las temperaturas superficiales del lugar seleccionado sean uniformes y que se han evitado los puentes térmicos o que incluso cualquier instalación pudiese variar y/o interferir en la toma de datos. Tal y como viene indicado en la norma ISO 9869:2014, y en su apartado localización del área medida, se indica que la ubicación apropiada de la localización de la monitorización.

Las reglas generales para realizar la termografía son las recogidas en la EN ISO 13187:1998 *Prestaciones de edificios. Detección cualitativa de irregularidades en cerramientos de edificios. Método de infrarrojos. (ISO 6781:1993 Modificada). (Ratificada por Aenor en noviembre 2000)*

Inicialmente se realizó una termografía en el área del edificio donde se iban a situar los sensores. El edificio consta de tres plantas. Se eligió la planta segunda intermedia para hacer la recogida de datos. Se fotografió térmicamente la fachada interior del salón de grados y la

fachada exterior contigua. Los recuadros rojos indicados en la figura III.6 muestran las áreas donde se realizaron las termografías. Desde el verano 2015 y hasta el año 2016 ha sido de gran dificultad obtener un salto térmico mayor de 10°C entre el ambiente interior y el exterior.

En las distintas fotografías de las figuras III.7 y III.8 se advierten colores azulados en las esquinas que indican que existe variabilidad en la temperatura superficial de la pared interior. La norma ISO 9869:2014 indica que no deben instalarse en las proximidades de los puentes térmicos, grietas o fuentes similares de error. Los sensores no deben estar bajo la influencia directa de cualquiera de un calentamiento o un dispositivo de refrigeración.

Es por ello que las superficies con variabilidad de temperaturas superficiales han sido rechazadas para la toma de datos. La figura abajo indica la superficie del análisis termográfico que fue realizado.

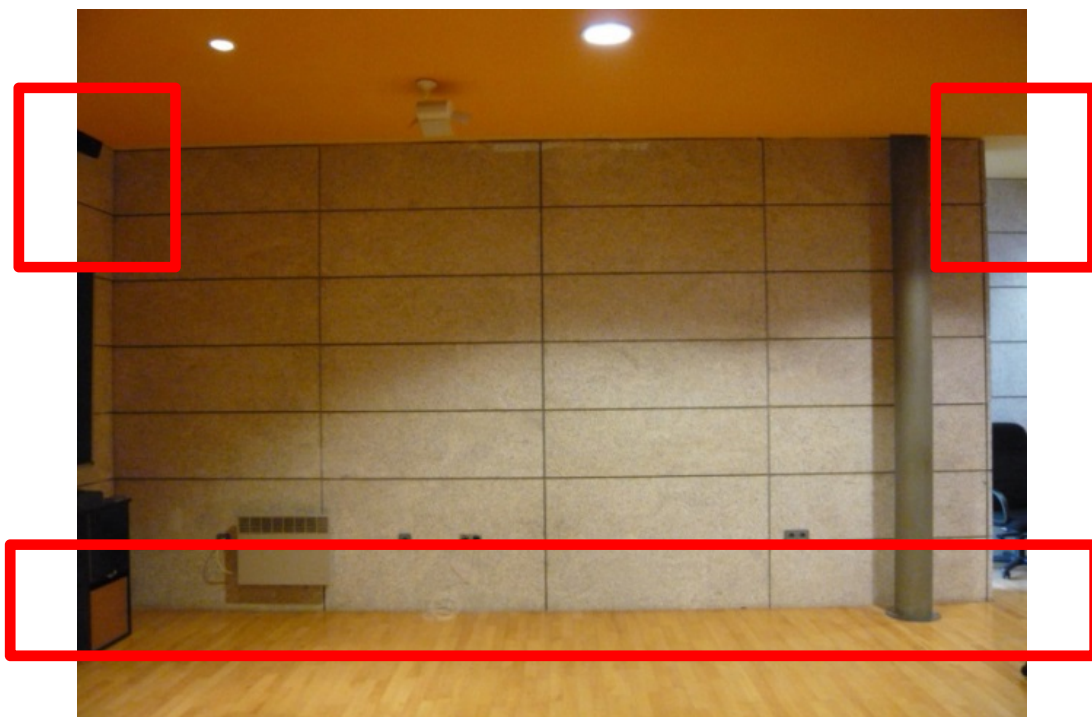


Figura III.6: Fachada interior analizada del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña 01/02/2016

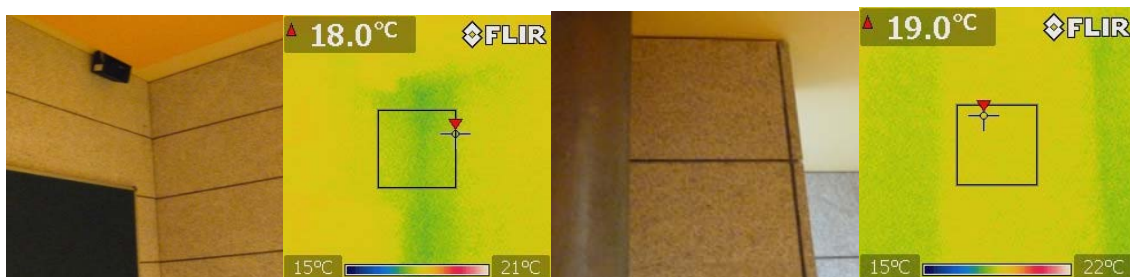


Figura III.7: Fotos de termografía de las esquinas superiores del cerramiento analizado

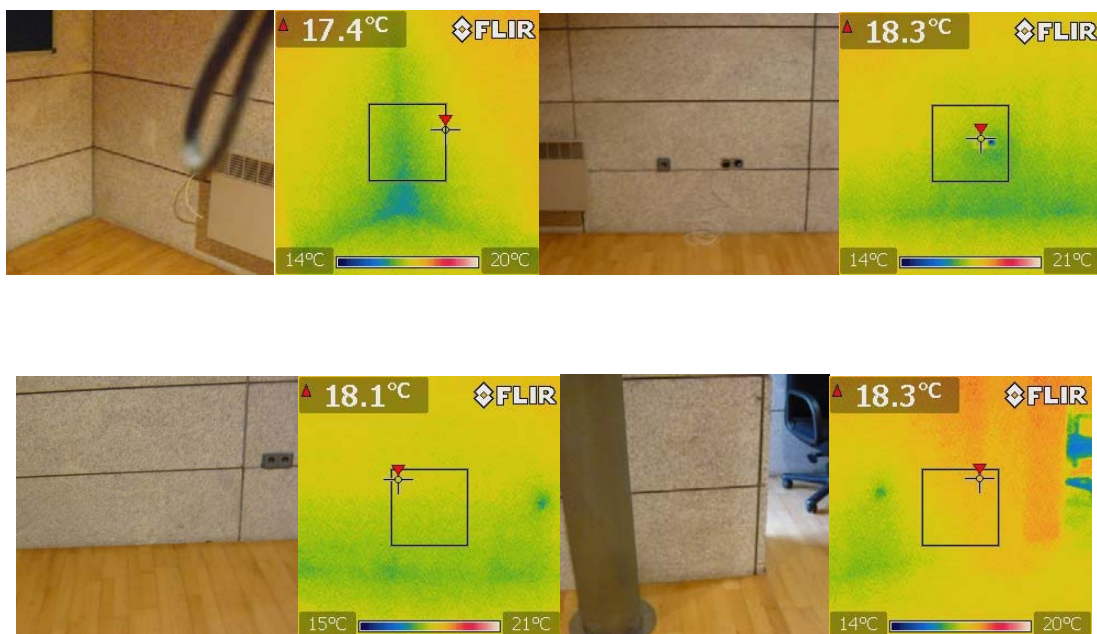


Figura III.8: Fotos de termografía de la superficie inferior del cerramiento analizado



Figura III.9: Fachada exterior analizada del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña 01/02/2016

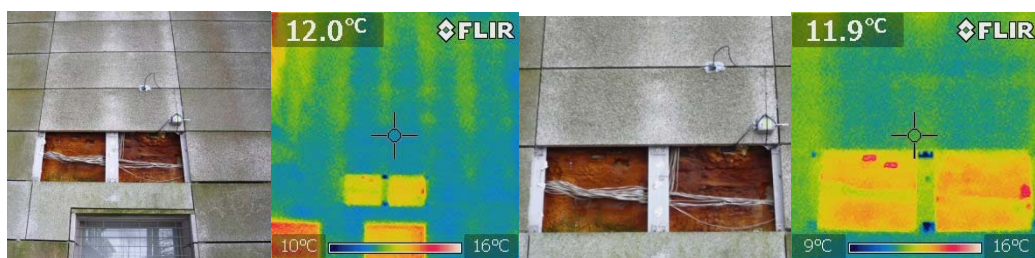


Figura III.10: Fotos de termografía de la parte del cerramiento exterior analizado

De las termografías se concluye que todas las localizaciones perimetrales deben ser descartadas para la disposición de los sensores de densidad de tasa de flujo de calor.

Siguiendo en la elección de la localización más acertada, se ha procedido por descarte. Han sido rechazados todos los aplacados de esta posición perimetral. Restan, por tanto, los aplacados del interior.

Siguiendo la norma ISO 9869:2014, se consideró y puede ser apropiado instalar varios sensores de densidad de tasa de flujo de calor con el fin de obtener un promedio representativo. Se decide, pues, colocar seis sensores de densidad de flujo de calor correspondiendo con cada aplacado intermedio y en su media geométrica, y separados entre ellos la distancia de un aplacado según la figura que se observa abajo. Se advierte también la no coincidencia en la disposición de la subestructura de aluminio exterior.

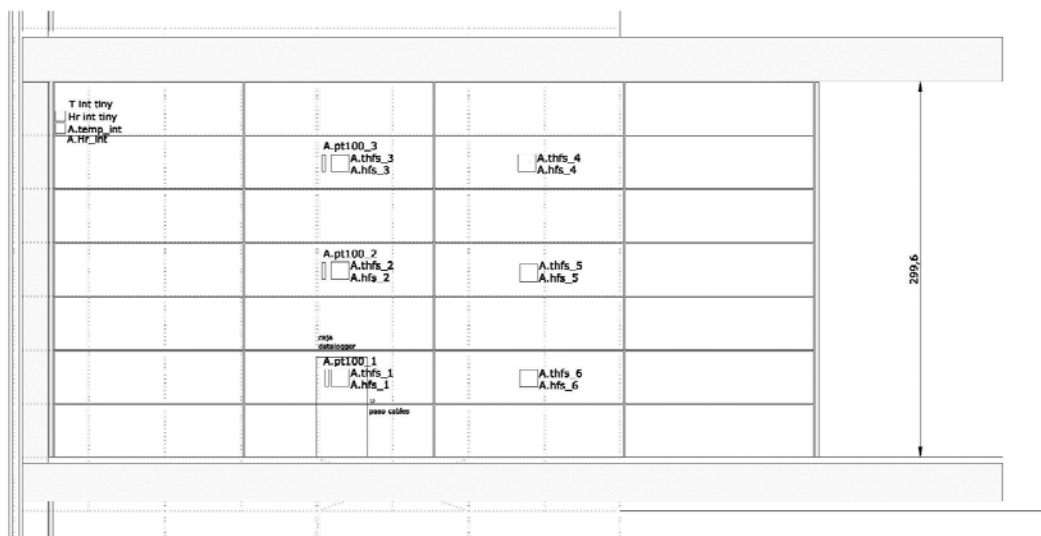


Figura III.11: Posición de los sensores en el alzado interior norte del salón de grados del edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de A Coruña

Además de los sensores dispuestos en la superficie interior, se dispusieron otros dos sensores en el espesor del cerramiento. El primero de ellos entre el hormigón y el aislamiento y el segundo entre el aislamiento y la cámara de aire. La posición del sensor más exterior elegida es determinante para seguir el procedimiento de (Rogass y Fisher, 2000)

También fueron recogidas la temperatura y humedad relativa en las posiciones de ambiente exterior, ambiente de cámara de aire y ambiente interior.

. Elección de los dispositivos de medida, disposición y su calibración

Densidad de tasa de flujo de calor

Para medir la densidad de tasa de flujo de calor, se han utilizado los **sensores de densidad de tasa de flujo de calor** (denominado en inglés Thin Film Heat Flux Sensors **HFS**). Es un dispositivo para la medición del flujo de calor que se propaga a través de un determinado elemento, quedando sujeto a un diferencial de temperatura.

En este trabajo, se utilizaron ocho sensores de flujo de calor de película fina flexible con unas dimensiones de 35x28,5 mm y con un espesor de unos 0,3mm en un soporte de película de poliamida. Cada uno de los sensores, con sus números de serie y su hoja de calibración de fábrica han sido adheridos a la superficie y además situados a diferentes alturas y distancias del diseño y teniendo en cuenta los resultados de la termografía previa.

Los HFS (Heat Flux Sensor) tienen las siguientes características: sensibilidad $\approx 2\mu\text{V}/\text{m}/\text{m}^2$, tiempo de respuesta $\approx 0,2\text{ s}$ y espesor $\approx 0,3\text{ mm}$. Este dispositivo incluye además un termopar tipo K para la lectura de la temperatura superficial sobre el que está adherido.

Cada sensor se suministra con un número de serie y cuya sensibilidad es especificada que es la que ha sido utilizada en el programa del registrador de datos para la obtención de datos empíricos. Estos dispositivos no requieren tensión de almacenamiento externa para su funcionamiento ya que ellos mismos autogeneran un voltaje proporcional a la diferencia de temperaturas existente entre sus caras. Este voltaje de salida es el que se mide con el registrador de datos. La señal de salida es generada de la siguiente manera; el sensor en contacto íntimo con el soporte que se quiere medir la tasa de transferencia de calor es atravesado por la misma energía que la propia superficie bajo estudio sobre la rejilla. Este hecho causa un gradiente de temperatura través de su barrera externa y este gradiente es proporcional a la tasa de transferencia de calor. Las más de 50 termopilas entre las caras miden la magnitud del gradiente y dan un voltaje de salida calibrado y observable con un multivoltímetro

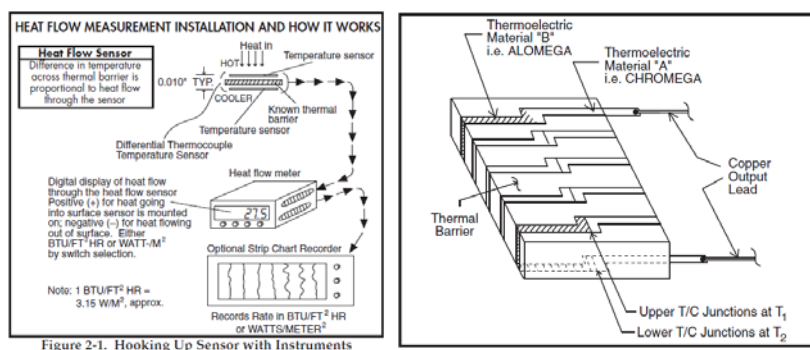


Figura III.12: Construcción de los sensores e instalación para la medición del flujo de calor. Guía del usuario HFS-3 y HFS-4 Omega.

La elección de estos sensores de la casa Omega Engineering ha venido determinada por la facilidad de colocación.

El hecho que fuese pequeño el sensor ha sido también un criterio positivo para su elección. (Rogass y Fisher, 2000) verifican positivamente la resolución del sensor de flujo de calor para medir las densidades de flujo de masa de los procesos de secado reales. Se evalúa también el efecto de cubrición ya que podría representar una barrera a la difusión del vapor de agua, eligiendo sensores de flujo de calor pequeños y monitorizaciones largas. Estos autores compararon en sus estudios los resultados obtenidos con medidas gravimétricas obteniendo buena correspondencia.

Para la fijación del sensor en la superficie del cerramiento, el fabricante suministrador recomienda la utilización de varias soluciones como *los adhesivos o epoxis convencionales*. También se puede utilizar la cinta por doble cara adhesiva tipo Mylar, el epoxi OB-200 de Omega y una cinta fina de poliéster. La distinta bibliografía consultada indica una variabilidad en el material elegido.

(Hulme y Doran, 2014) Para la conexión del sensor se utilizó una fijación mecánica a presión consistente en una abrazadera de conexión flexible y un mástil vertical. Para asegurar la buena conexión térmica se dispuso de vaselina y una muy fina capa de polietileno.

(Rhee-Duverne y Baker, 2013) Para la fijación de los sensores de flujo de calor se utilizó una cinta adhesiva de doble cara y una cinta adhesiva de baja adhesión aplicada en el muro.

(Rye y Baker, 2011) En la fijación de los sensores de flujo de calor se utilizó una cinta adhesiva de doble cara y una cinta adhesiva de baja adhesión aplicada en el muro. Cuando las superficies del muro eran irregulares, se utilizó una cantidad pequeña de sellador de silicona.

Advertidas estas soluciones variadas para la fijación sobre la superficie, se opta inicialmente por una cinta de tela adhesiva con armado de fibras gris. La siguiente monitorización de la que se extraería el valor de transmitancia térmica se utilizaría silicona. En las monitorizaciones de verificación y contraste también fue utilizada la cinta a doble cara.

Además de realizar la medición del flujo de calor en el cerramiento con los sensores de densidad de tasa de flujo de calor, medición que se considera evidente, se decidió monitorizar más variables.

La temperatura y humedad ambiental

En la medición de la temperatura y humedad ambiental para el exterior y el interior se han seleccionado los transmisores 4-20 mA de HR% y Temperatura tipo THR-370/CM de Desin Instruments. Expresado por el fabricante, estos sensores *poseen un sensor de HR capacitivo consistente en un condensador en el que su dieléctrico varía según el porcentaje de humedad relativa, modificando su capacidad. Estas variaciones de capacidad del condensador son convertidas, por medio de circuitos adecuados, en una señal eléctrica de 4-20mA. Disponen también de un sensor PT-100 también con salida de 4-20 mA. Estos sensores están protegidos por una caja estanca.*

Para la medición de la temperatura superficial en las superficies interiores de granito el tipo el sensor utilizado fue PT-100 de gran precisión.

Para la medición de la temperatura y humedad ambiental del interior y de la cámara se ha utilizado los registradores de datos tipo tinytag. Se ha considerado conveniente utilizarlos ya que son aparatos que pueden ponerse en comparación con aparatos de mayor precisión.

La presión de vapor de agua

Para la obtención del dato de presión de vapor de agua, tal y como ya se dijo, se ha considerado como dato indirecto, obtenido a través de la recogida de temperatura y humedad relativa ambiental tanto en el exterior, en la cámara como en el interior, utilizando los diagramas psicrométricos y las tablas de la presión de vapor de saturación a las diferentes temperaturas, recogida en la norma DIN 4108. Parte 3

En resumen, han sido cuatro tipos de sensores que se han dispuesto para recoger los valores de temperatura, humedad relativa, densidad de tasa de flujo de calor y presión de vapor. El

esquema abajo indicado da muestra del resumen de las variables monitorizadas y de los dispositivos que se han utilizado.

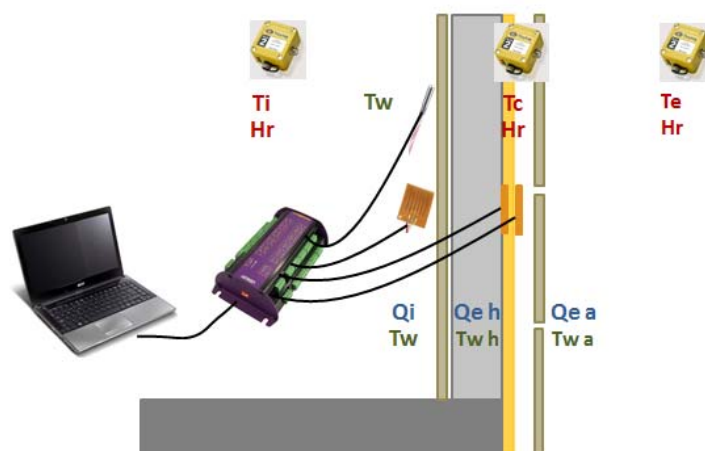


Figura III.13: Posición de los sensores exterior-cámara e interior y sensores de densidad de tasa de flujo de calor de la fachada ventilada norte del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura en la segunda monitorización de febrero a marzo 2016

Variable de medida	Unidades	exterior	cámara	interior
Densidad de tasa de flujo de calor	W/m^2	--	(HFS 1) hormigón (HFS-1b) aislamiento	(HFS-1-6)
Temperatura ambiental	$^{\circ}C$	(Te)	(Tcam)	(Ti)
Temperatura superficial	$^{\circ}C$	-	-	(Tsup)
Humedad relativa ambiental	%	(HRe)	(HRcam)	(HRi)
*Presión de vapor	Pa	(Pve)	(Pvc)	(Pvi)

Tabla III.1: Variables monitorizadas in situ en la fachada ventilada de granito del Edificio de Departamentos de la ETSAC, Universidad de A Coruña en febrero del 2016. (*) Medida indirecta

A continuación se muestra una tabla resumida donde se indica la instrumentación utilizada para la toma de datos.

Tipo de dispositivo	Foto	Medida	Precisión
Omega Thin Film Heat Flux Sensor THFS-4		W/m^2 Densidad de tasa de flujo de calor	1.80 $\mu V/W/m^2$
PT-100 Desin Instruments		$^{\circ}C$ Temperatura	Sonda PT-100 4 hilos

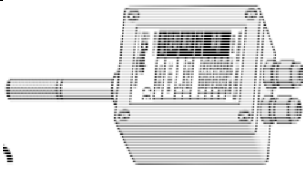


THR-370/CM Desin Instruments		°C y % Sensor de temperatura PT 100 Sensor de humedad capacitivo	Exactitud +-2 %HR
Gemini tinytag plus2 TGP-4520		°C y % Temperatura exterior y humedad relativa	
Datataker DT-85 Serie 2 data logger		Recogida de datos 16 canales	

Tabla III.2: Resumen de los dispositivos utilizados en la recogida de las variables en la monitorización in situ durante el mes de febrero y marzo del 2016

. Forma y adquisición de datos

En la forma y adquisición de datos, las etapas fueron las siguientes. Se procedió a realizar inicialmente una termografía de la fachada ventilada en la cual fueran detectadas las variaciones térmicas perimetrales, concretamente en contacto con el suelo, esquina y techo. Este trabajo previo supuso la elección de las posiciones adecuadas por el interior de los sensores para evitar las variaciones térmicas, así como la colocación de un sensor también por el exterior.

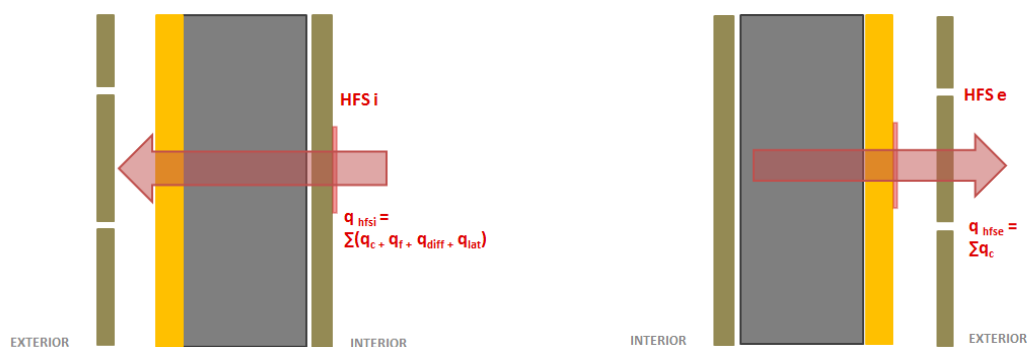


Figura III.14: Tipos de densidad de tasa de flujo de calor recogidos según la posición del sensor y condiciones no isotérmicas (Adaptado de Rogass y Fisher, 2000)

Los sensores utilizados, exceptuando los tinytag fueron conectados a un registrador de datos denominado Datataker tipo DT-85 Serie 2. Las conexiones muestran en la figura III.15 el número de canales empleados. El registrador posee 16 canales suficientes para llevar a cabo esta recogida de datos de campaña.

La adquisición de datos ha sido realizada mediante la ayuda de un programa desarrollado expresamente con la ayuda del software Delogger 5 después de estudios diversos alternativos. Cada monitorización tuvo un programa expreso diseñado al efecto.

Registro de datos

Para la adquisición de datos se ha obedecido a las indicaciones realizadas en la norma que indican que:

“Los datos se registrarán de forma continua o en intervalos fijos durante un período de días completos. El período máximo de tiempo entre dos registros y la duración mínima del ensayo depende de

- *la naturaleza del elemento (pesado, ligero, dentro o aislamiento exterior);*
- *la temperatura interior y exterior (promedio y las fluctuaciones, antes y durante la medición);*
- *el método utilizado para el análisis.*

La duración mínima del ensayo es de 72 horas si la temperatura es estable en el HFM. De lo contrario, esta duración puede ser más de 7 días. Sin embargo, la duración real de la prueba se determinará mediante la aplicación de criterios a los valores obtenidos en el transcurso de la prueba. Estos valores se obtienen sin necesidad de interrumpir el proceso de adquisición de datos.”

...Se recomienda que las grabaciones se realicen a intervalos de tiempo fijos que son los valores promedio de varias mediciones de la muestra a intervalos más cortos.”

En el caso que nos ocupa, la cadencia en la recogida de datos fue de 15 minutos, realizándose cuatro adquisiciones de datos por hora hasta completar el periodo de seis semanas durante los meses de febrero y marzo del 2016. Se consideró suficiente la recogida de datos cada 15 minutos, ya que el dato horario es representativo de cuatro valores. Esta recogida ha cumplido el procedimiento de la norma ISO 9869:2014.

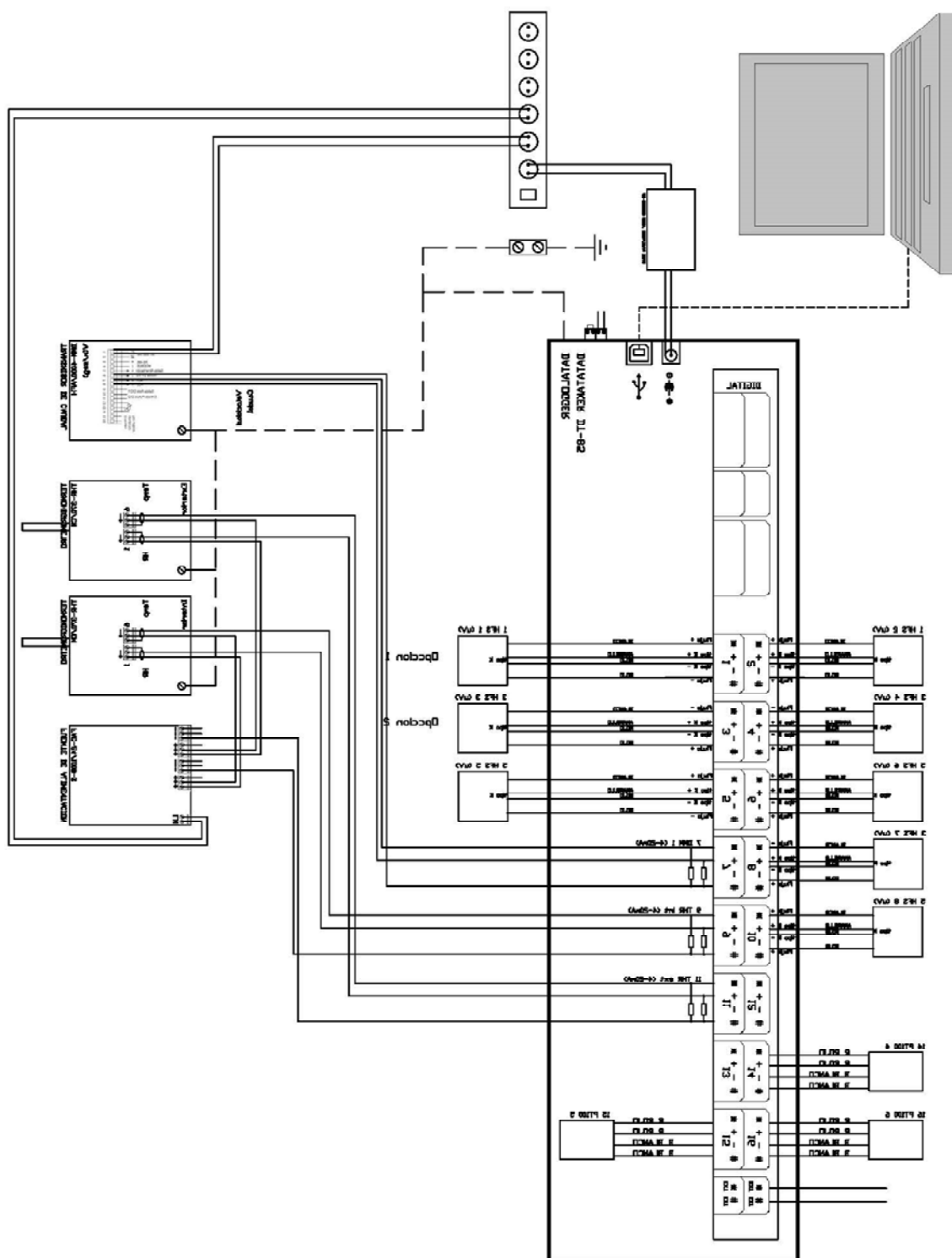


Figura III.15: Plano de conexiones del Datataker DT-85 con los sensores instalados

En el caso de la monitorización del 2017, la recogida de datos fue obtenida por minutos, realizándose valores promedio horarios para así incrementar la calidad de la medida.

Con respecto a la duración de la monitorización, el cerramiento de la fachada ventilada de granito analizado se clasificó como pesado, por lo que la inercia térmica ha de ser tomada en cuenta. En segundo lugar, el método elegido para el análisis es el método de la media y con respecto a las fluctuaciones de temperatura exterior e interior, es difícil obtener saltos térmicos mayores de 10°C en este clima, por lo que se ha decidido realizarlo en los meses más fríos del año y en las fechas que se han indicado en cada caso.

(Desogus, Mura, & Ricciu, 2011) en relación a la duración de la prueba indicaban que:

“...Son necesarios al menos 72 horas de mediciones para calcular la resistencia térmica. Su principal desventaja es la diferencia entre los resultados del test y los resultados teóricos, los cuales son más grandes que con la técnica de la caja caliente. Este error alcanza 10% con una diferencia de temperatura de 10°C. ...Cuanta menor diferencia de temperatura, menos precisión en la medida...” Con menos de 10°C la medida no sería precisa. Si existen condiciones adecuadas medioambientales, la mejor forma para la evaluación R-value de los edificios sería directa con los sensores. De otra forma, si las condiciones no son ideales, podría hacerse de las otras dos formas aunque menos precisas...”

Para la justificación del inicio de la monitorización en los días más fríos del año fueron analizados los valores normales de temperatura y humedad relativa. En la tabla III.3 y tabla III.4 se han expresados los valores normales de temperatura y humedad, así como los recogidos durante un año en un ensayo de monitorización de una fachada ventilada en A Coruña durante 2008-2009. Como se pueden observar las amplitudes de las temperaturas no son excesivas dando un máximo absoluto de alrededor de 12°C.

	ENE	FEB	MAR	AB	MAY	JUN	JUL	AG	SEPT	OCT	NOV	DIC
*NORMALES T °C	10,4	10,9	11,7	12,5	14,4	16,7	18,7	19,2	18,2	15,6	13	11,5
**MED 08-09 T °C	9,3	9,2	11,3	11,4	14,8	17,8	19	19	21	14,4	12,3	9,7

Tabla III.3: Valores de temperatura normales* 1971-2000 y recogidos en la monitorización higrotérmica** mayo 2008-abril 2009. A Coruña (España)

	ENE	FEB	MAR	AB	MAY	JUN	JUL	AG	SEPT	OCT	NOV	DIC
*NORMALES HR%	76	76	73	75	77	77	79	78	78	78	77	77
**MED 08-09 HR%	71,1	81	71,5	78,4	78,8	80	78	84,4	70	81,9	69,8	76,6

Tabla III.4: Valores de humedad relativa normales* 1971-2000 y recogidos en la monitorización higrotérmica** mayo 2008-abril 2009. A Coruña (España)

Durante el transcurso del año 2016, se planteó iniciar la monitorización en el mes de diciembre pero las altas temperaturas recogidas en esas fechas fueron demorando la puesta en marcha de la monitorización. Finalmente y también tras un mes de enero no muy frío, se decidió dar inicio en el mes de febrero del 2016. Las figuras anteriores constatan que los valores normales de temperatura (1971-2000) en el mes de enero y febrero son muy similares, a pesar que el mes de diciembre es un valor medio ligeramente superior.

La época seleccionada para la monitorización se corresponde con los meses de las mayores diferencias térmicas entre el interior de un edificio y el exterior. El ensayo dio comienzo el 2 de febrero del 2016. La duración del ensayo fue de un mes y medio. Se ha decidido colocar varios sensores para minimizar las variaciones que con respecto a la altura pueda tener la temperatura y dar una medida más precisa del valor de transmitancia térmica.

En el caso de la monitorización del año 2017, la monitorización comenzó el 19 de enero y duró hasta el 6 de febrero. Fueron diecisiete días. Se repitió el mismo procedimiento para la obtención del valor de la transmitancia térmica.

Puesta en funcionamiento de la monitorización de la densidad de tasa de flujo de calor 2016

Una vez realizada la termografía, se procedió al replanteamiento de la colocación de los seis sensores de la superficie interior y la realización de un hueco en el muro para el paso de los cables al otro lado de la fachada.

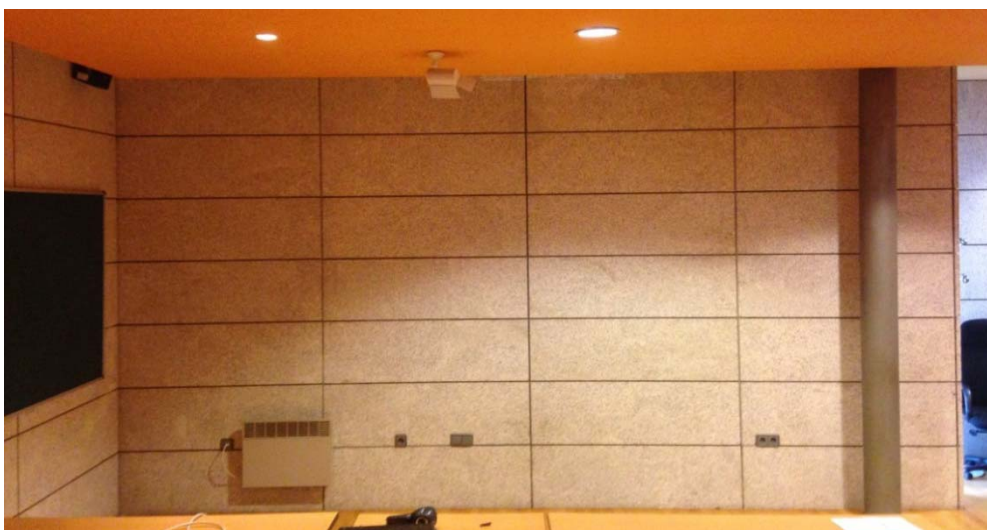


Figura III.16: Fotografía del muro interior del Salón de grados del edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de A Coruña donde se situarán los sensores.

Para el paso del cableado de los sensores exteriores, y bajo la caja eléctrica se realizó un agujero de 25mm. Por este agujero se pasaron todos los cables necesarios de la monitorización del interior. Una vez realizado el agujero se dio paso a todo el cableado necesario para la disposición de los sensores que fueron utilizados en el exterior. Puede observarse en las fotos como los cables han quedado para ser dispuestos en el registrador de datos.



Figura III.17: Foto del sensor de temperatura ambiental y humedad relativa exterior. Paso de cables hacia el interior del cerramiento

Una vez obtenido el paso de todos los cables, se fueron colocando los sensores. En el exterior, se prepararon las superficies para alojar los sensores de densidad de tasa de flujo de calor en la cara exterior del cerramiento. En este caso puede observarse el dispositivo de medida de humedad relativa y temperatura ambiental colocada inmediatamente cercana a la fachada ventilada.

Todos estos cables fueron recogidos en el registrador de datos tipo Datalogger DT-85. Este aparato se dispuso en el interior del salón de grados. El aparato fue colocado protegido térmicamente y acústicamente para que no interfiera su ruido en las actividades del salón de grados. La foto advierte de esta condición.

También se puede observar en la página siguiente cómo fueron adheridos los sensores de flujo de calor, con cinta de tela armada con fibras.



Figura III.18: Caja de recogida de datos con el datalogger en el interior. Detalle de colocación del sensor superficial de temperatura PT-100. Imagen del Datalogger.

El día 18 de febrero del 2016 se colocó un tinytag exterior en la barandilla inmediata a la fachada y también otro tinytag en el interior de la sala.



Figura III.19: Posición de los sensores tipo tinytag que recogen temperatura y humedad relativa, uno en el exterior y otro en la cámara de aire. Fotografía tomada el 18 de febrero de 2016 en la fachada ventilada norte del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña.

Los aparatos dispuestos en la cámara ventilada indicada en el plano anterior son un tinytag que informa de la temperatura en la cámara y su humedad relativa. Se dispuso el día 15 de

febrero a las 12:15 horas. Además se colocaron dos thfs uno en la superficie del poliuretano y protegido por la cinta gris y otro en contacto con el hormigón armado. Finalmente se procedió al cerrado del aplacado de la fachada ventilada.

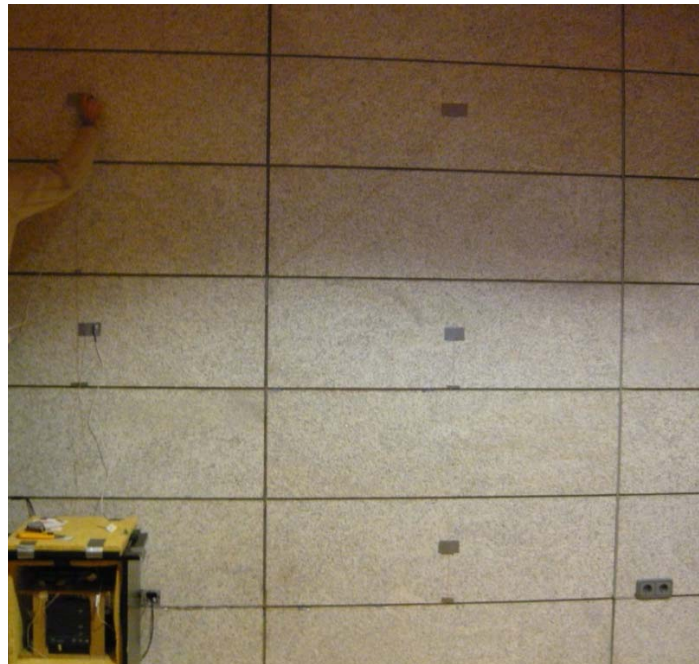


Figura III.20: Disposición de los sensores de flujo de calor repartidos en la superficie interior



Figura III.21: Disposición del revestimiento de madera para la realización de la monitorización segunda

Puesta en funcionamiento de la monitorización de la densidad de tasa de flujo de calor 2017

Debido a errores de signo y magnitud encontrados tras el análisis de datos de la segunda monitorización, se procedió nuevamente a realizar una **tercera monitorización** para la fachada ventilada de granito del edificio de departamentos durante el periodo de enero y febrero del 2017, un año después de la anterior toma de datos.

El **objetivo** fue recopilar nuevamente medidas de temperatura, humedad relativa y densidad de tasa de flujo de calor en la fachada ventilada de granito. Se buscaba obtener un patrón diario característico de comportamiento higrotérmico, en particular, de la densidad de tasa de flujo de calor. También se buscaba obtener un valor de transmitancia térmica o valor U fiable y corregir los errores advertidos en la anterior recogida de datos.

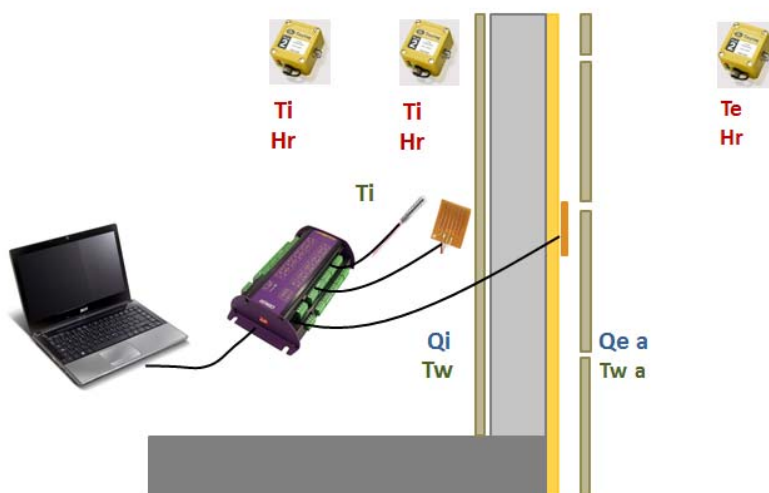


Figura III.22: Posición de los sensores exterior-cámara e interior y sensores de densidad de tasa de flujo de calor de la fachada ventilada norte del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura en la tercera monitorización de enero a febrero 2017

La prueba comenzó el 19 de enero del 2017 y duró hasta el día 6 de febrero del 2017. Durante este periodo de monitorización se consiguieron registrar temperaturas anormalmente bajas para la localización de A Coruña.

Para esta toma de valores, se colocaron dos sensores, uno en la columna de la izquierda sensor de flujo de calor hfs3 y otro en la derecha hfs2. Se recogieron también en la columna de la derecha temperaturas superficiales, uno situado a baja altura y otro a alta altura para comprobar si existía estratificación de temperaturas por alturas. A su vez, se dispuso un sensor de temperatura ambiental cercana al sensor de flujo de calor hfs2 y tres sensores de temperaturas y humedades relativas ambientales, dos en el interior, una en el centro de la sala y otra cercana a la superficie de pared de medida. El último registrador de datos tipo tinytag fue dispuesto en el exterior.

Pueden observarse en las figuras III.24, III.25 y III.26 como fueron colocados los sensores de densidad de tasa de flujo de calor.

Una de las primeras pruebas que se realizaron previas a la recolocación de los sensores fue construir un mapa de temperaturas superficiales interiores del cerramiento, esta vez utilizando una pistola de rayos infrarrojos. Esta prueba fue repetida otra vez el día 3 de febrero del 2017. La figura III.23 representada muestra el rango térmico obtenido en la superficie del cerramiento en contacto con el exterior.

C4	C3	C2
18,60	18,85	19,30
18,75	18,90	19,20
18,60	18,85	19,00
18,60	18,60 (HFS3)	18,75 (HFS 2)
18,40	18,45	18,60
18,00	18,10	18,30
17,40	17,55	17,95

Figura III.23: Alzado interior de la fachada ventilada de granito norte. Datos de temperatura superficial de granito en [°C] el 3 de febrero del 2017 obtenidas con termómetro infrarrojos. Posición de los sensores de densidad de tasa de flujo de calor HFS2 y HFS3.

Es de notar cómo los valores ascienden con la altura, mostrando la existencia de una estratificación térmica en vertical en cada columna de los aplacados de granito. También los datos recogidos de los sensores tipo PT-100 han recogido una estratificación de temperaturas según la altura.

En el caso horizontal, existe también un aumento de valor a medida que el cerramiento se acerca hacia el interior. Existe un incremento de la variación de aproximadamente 0,7°C hacia la derecha del cerramiento.

Los valores de las temperaturas superficiales mostraron una variabilidad desde 17,40°C hasta 19,30°C. El valor medio de todos los datos fue de 18,51°C y la mediana o percentil 50% de 18,60°C. Estos resultados llevaron a la elección de las posiciones que mejor representan al cerramiento. En la figura están indicados los lugares medios de los aplacados utilizados.

A partir de ahí se procedió a la puesta en funcionamiento de la monitorización. La primera parte consistió en realizar una prueba de calibración de todos los aparatos comprobando que las medidas no difiriesen. Una vez comprobado, se colocaron los sensores en su posición elegida. Puede verse en las figuras III.24, III.25 y III.26 este proceso indicado.

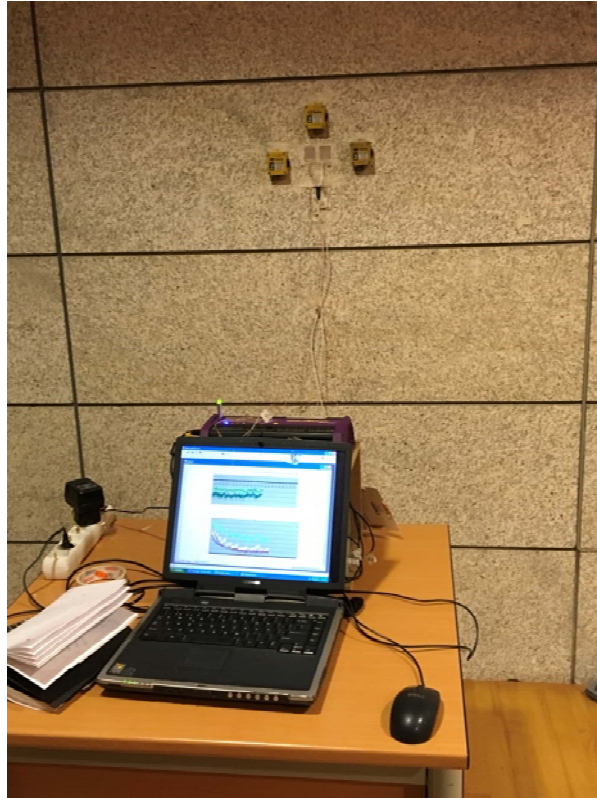


Figura III.24: Prueba de pretest con todos los sensores en la misma posición



Figura III.25: Posición de los dos sensores de temperatura superficial (PT-100) en el pretest de contraste de la prueba realizada en enero y febrero del 2017



Figura III.26: Posición de los dos sensores de temperatura superficial (PT-100) y los dos sensores de densidad de tasa de flujo de calor (HFS2 y HFS3) en la prueba realizada en enero y febrero del 2017

III.2.3 MODELO NUMÉRICO DE SIMULACIÓN

En la actualidad, los análisis numéricos de simulación en los edificios son realizados mayoritariamente con herramientas energéticas. Sin embargo, estos programas de simulación energética normalmente tratan el intercambio de humedad de una forma simplificada (Delgado et al, 2010). Dado que el estudio se centra en la contribución que la humedad realiza al comportamiento higrotérmico y como consecuencia al consumo de energía, se ha considerado necesario utilizar una herramienta de simulación higrotérmica, que valore la contribución con este enfoque. Estos programas informáticos facilitan enormemente la realización de los cálculos de los modelos matemáticos desarrollados.

El estudio de los modelos HAM (calor, humedad y aire) para los edificios empezó en los años 30. En 1958, Glaser desarrolló un método de cálculo que combinaba la difusión de vapor con la conducción de calor en estado estacionario. Entre los años 50 y 60, se publicaron modelos que incluían la difusión de vapor, transporte de agua por capilaridad, humedad inicial, calor latente de evaporación y condiciones transitorias.

En la actualidad existen multitud de modelos de simulación higrotérmica para los cerramientos. Delgado et al, publicó en 2010 catorce modelos higrotérmicos disponibles de tipo 1-D para el público en general, que están recogidos en la tabla III.5. Como se observa, no todos los programas necesitan las mismas propiedades para incorporarlos al cálculo.

Según Ojanen et al, (1995) la complejidad de los modelos se incrementa en términos del número de procesos tenidos en cuenta de transporte, de modelado de las interacciones y la dependencia de las propiedades de los materiales. Ojanen argumenta que fundamentalmente la diferencia entre modelos se encuentra en la forma en la que se modela los intercambios de calor en las cavidades y los espacios de aire, en la que se modela el calor, aire, vapor y el flujo de agua líquida, y en la que se asignan las condiciones del ambiente interior y exterior

Según Straube J y Burnett E, (2009) para elegir el modelo adecuado de comportamiento higrotérmico, se evalúan los factores siguientes:

1. Las dimensiones en el transporte de humedad: una, dos o tres dimensiones
2. Tipo de flujo: estado estacionario, estado cuasi estacionario, o dinámico
3. Calidad y disponibilidad de la información
4. Naturaleza estocástica (de naturaleza aleatoria en el tiempo) de cada conjunto de datos (por ejemplo: propiedades del material, tiempo, calidad de la construcción)
5. El grado en el cual estos factores son tenidos en consideración es la medida de sofisticación del modelo.
6. En las propiedades de los materiales, los modelos detallados requieren permeabilidad al agua y al vapor de agua, difusividad de la humedad y valor de conductividad térmica, todas como función de la temperatura, contenido de humedad y edad.

Name	Type	Material Properties														Boundary Conditions (outside)										B.C. (inside)			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	I	II	III	IV
1D-HAM	1D-HAM	X		X	X	X	X							X		X	X	X	X				X			X	X		
BSim2000	1D-HM	X	X	X	X	X	X							X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	
DELPHIN 5	1/2D-HAMPS	X	X	X	X	X		X	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	
EMPTYED	1D-HAM	X		X	X		X							X		X	X	X								X	X	X	
GLASTA	1D-HM	X		X	X		X	X								X	X		X				X			X			
hygIRC-1D	1D-HAM	X		X	X	X	X		X	X				X		X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	
HAMLab	1D-HAM	X		X	X			X			X	X				X	X		X	X		X	X			X	X		
HAM-Tools	1D-HAM	X	X	X	X	X	X		X		X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	
IDA-ICE ^(*)	1D-HAM	X		X	X	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X		X			X	X		
MATCH	1D-HAM	X	X	X	X	X	X		X		X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X			X	X		
MOIST	1D-HM	X		X	X	X	X		X	X				X		X	X		X	X	X		X			X	X		
MOIST-EXP.	1/2D-HAM	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
UMIDUS	1D-HM	X	X	X	X	X		X								X	X		X	X	X					X	X		
WUFI ^(**)	1/2D-HM	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X				X	X		X	X	X	X	X	X		X	X		

(*) IDA-ICE version with HAMWall

(**) WUFI family: WUFI-Plus, WUFI-2D, WUFI-Pro and WUFI-ORN/IBP. A free research and education version of WUFI-ORN/IBP for USA and Canada is available.

List of Symbols

1-Bulk density	12-Specific moisture capacity	G-Precipitation
2-Porosity	13-Air permeability	H-Long-wave exchange
3-Specific heat capacity	14-Hysteresis in sorption isotherm	I-Cloud index
4-Thermal conductivity		J-Water leakage
5-Sorption isotherm	A-Temperature	
6-Vapour permeability	B-RH / Humidity ratio / Dew point / Vapour pressure/concentration	I-Temperature
7-Vapour diffusivity	C - Air pressure	II-RH / Humidity ratio / Dew point / Vapour pressure/concentration
8-Suction pressure	D - Solar radiation	III-Air pressure
9-Liquid diffusivity	E - Wind velocity	IV-Interior stack effect (T and RH)
10-Diff resistance factor	F- Wind direction	
11-Water conductivity		

Tabla III.5: Información de los softwares de modelos higrotérmicos comerciales (Delgado et al, 2010)

Para someter a la fachada a condiciones de uso, se pueden aplicar modelos de análisis higrotérmico simples y más complejos. El modelo más simple y comúnmente utilizado es el **método Glaser** (1958). En España, este método se recoge en la norma UNE EN 13788:2002 de actual obligado cumplimiento e indicado por el C.T.E. Existe un documento de apoyo para su correcta aplicación. Este modelo asume que la envolvente de la edificación es de una dimensión y que todo el transporte de humedad es dirigido por la difusión de vapor. Asume unas condiciones estacionarias y unas propiedades del material invariables.

Este método no tiene en cuenta la humedad en el material o la del agua de lluvia absorbida durante la construcción. Mientras que es útil para comparar el comportamiento entre diferentes elementos, no proporciona una predicción precisa de las condiciones de humedad dentro de las condiciones de servicio del elemento. La evaluación por el método de Glaser no es apropiada cuando se presentan materiales higroscópicos y donde hay lluvia y capilares abiertos.

Browne, (2012), entre otros autores, expone las limitaciones de este método:

“a) La conductividad térmica depende del contenido de humedad y el calor es liberado/absorbido por la condensación/evaporación. Esto cambia la distribución de la temperatura y los valores de saturación y afecta a la cantidad de condensación/evaporación.

b) El uso de materiales con propiedades constantes es una aproximación.

- c) *En muchos materiales existe succión capilar y transferencia líquida de humedad y esto podría cambiar la distribución de humedad.*
- d) *Los movimientos o fugas de aire en las cámaras podrían cambiar la distribución de humedad por la convección de humedad. La lluvia o la nieve fundida pueden afectar también las condiciones de humedad.*
- e) *En la realidad, las condiciones límite no son constantes a lo largo de un mes.*
- f) *La mayoría de los materiales son más o menos higroscópicos (tienen cierta capacidad de absorber vapor de agua).*
- g) *Se presupone una transferencia de humedad unidimensional.*
- h) *Se desprecian los efectos de radiaciones solares y de onda larga. En elementos de construcción con flujos de aire a través o dentro del elemento, los resultados calculados pueden ser extremadamente irreales y se deberá tener mucho cuidado cuando se interpreten los resultados.”*

Como solución a estas limitaciones del modelo simple, y queriendo predecir con más exactitud el comportamiento, se utilizan modelos más complejos. Bajo el título *Comportamiento higrotérmico de componentes de edificios y elementos constructivos. Evaluación de la transferencia de humedad mediante simulación numérica* la norma EN 15026:2007 es utilizada para evaluar el comportamiento higrotérmico y en estado transitorio las condiciones de humedad y calor en el cerramiento multicapa y sujeto a condiciones climáticas no constantes en cada lado.

Los modelos transitorios cubiertos por este estándar toman en consideración el almacenamiento del calor y la humedad, los efectos del calor latente, y el transporte líquido y convectivo bajo condiciones reales e iniciales. Situación más similar a la realidad. El procedimiento seguido para el análisis higrotérmico bajo este estándar es mostrado en la norma bajo un diagrama de toma de decisiones donde se especifica cada una de las fases.

En este procedimiento se necesitan incorporar en general datos sobre las condiciones climáticas externas e internas, las propiedades hídricas y térmicas de los materiales que forman el cerramiento. Propiedades que además varían según la herramienta de simulación del modelo matemático elegido.

Además, la simulación higrotérmica es menos costosa que la extracción de datos in-situ y ayuda a la predicción. En la situación concreta del edificio, existe una elevada humedad relativa, altas precipitaciones y riesgos continuos de puntos de rocío y condensaciones (agua en todos sus estados) en las condiciones ambientales. En este caso, y dado que el edificio lleva 20 años en uso (1996-2016), este procedimiento será de gran ayuda para ver cuál ha sido el comportamiento higrotérmico que ha sufrido en la fachada y poder contrastarlo con medidas que se hayan tomado de la realidad.

Se ha decidido, pues, que para el estudio del comportamiento higrotérmico de la fachada norte del edificio de departamentos de la E.T.S.A.C. de la Universidad de A Coruña se utilice también este tipo de métodos.

El programa de cálculo WUFI Pro 5.3 y la justificación de su elección.

Para el caso de la fachada que nos ocupa, se ha elegido para el estudio higrotérmico la herramienta WUFI del Fraunhofer Institute for Building Physics (y que cumple con los requisitos EN 15026:2007). El programa WUFI es el acrónimo en alemán de "*Wärme-und Feuchtetransport instationär*" (transporte en estado transitorio de calor y humedad). Está diseñado para calcular el transporte simultáneo calor y humedad de una dimensión y para componentes de la edificación de varias capas. La idea física y numérica bajo la cual WUFI fue desarrollado es fruto de una tesis doctoral realizada en 1994 por Hartwing M. Künzle y basado en un modelo de cálculo previo desarrollado por Kießl en 1983.

Este programa es ampliamente utilizado en Europa, EE.UU y Canadá. Se considera una de las herramientas más avanzadas, habiendo sido validada con experimentos a escala real durante años (Straube y Schumacher, 2006). Su validación experimental ha dado buenos resultados por los que constituye un programa de referencia a nivel internacional (De Freitas et al, 2008), motivo principal de su elección. Son numerosas las actualizaciones que hasta la fecha se han realizado. Este estudio ha utilizado la versión 5.3.

Para el cálculo del transporte de calor, WUFI tiene en consideración los mecanismos de transporte de humedad indicados en la tabla siguiente. Se ha descartado el transporte de calor por convección por medio del flujo de aire, dado que es normalmente difícil cuantificar en una dimensión. Se ignora el transporte del flujo convectivo en el flujo de aire. No se han incluido el flujo a través de la gravitación, flujo hidráulico a través de las diferencias de presión, así como los efectos osmóticos y electro-cinéticos. (Browne D., 2012)

WUFI	Heat	Vapour	Liquid
Considered & Includes:	1. Conduction 2. Enthalpy Flows (via Moisture)	1. Gas Diffusion 2. Molecular Effusion	1. Capillary Conduction 2. Surface Diffusion
Does Not Consider or Include:	1. Air Flow 2. Radiation	1. Solution Diffusion 2. Convection	1. Seepage Flow 2. Hydraulic Flow 3. Electrokinetics 4. Osmosis

Tabla III.6: Mecanismos considerados y no considerados en el ensayo WUFI Pro 5.3

El cálculo numérico del transporte simultáneo de calor y humedad

Se puede explicar la forma en la que los mecanismos de transporte y almacenamiento de humedad y calor están incorporados en los cálculos a través de las ecuaciones utilizadas por la herramienta y que son las que se resumen a continuación.

El contenido de calor de un material bajo condiciones de presión constante se llama entalpía. Existe una relación aproximadamente lineal entre la entalpía de un material y su temperatura. La ecuación de balance de entalpía total (humedad y calor) es reflejada en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla q + S_h$$

Dónde:

H	[J/m ³]	Entalpía total (suma de entalpia de un materia seco y uno húmedo $H_s + H_w$)
q	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor
S_h	[W/m ³]	Fuente o sumidero de calor

La densidad de flujo de calor es proporcional a la conductividad térmica de un material húmedo y al gradiente de temperatura según la ecuación, siguiendo la Ley de Fourier:

$$q = -\lambda \nabla t$$

Dónde:

q	[W/m ²]	Densidad de flujo de calor
λ	[W/mK]	Conductividad térmica de un material húmedo
t	[°C]	Temperatura

En la ecuación primera de balance de entalpía total, se ha tenido en cuenta también el movimiento y cambio de fase. Se ha considerado solamente la difusión de vapor de agua simultáneamente a la transición de cambio de fase, ya que puede ser de gran relevancia en los procesos de secado y del balance de energía. La entalpía de sorción en el rango de humedad relativa por encima de 50%, si se compara con la entalpía de evaporación, es despreciable en la mayoría de los materiales:

$$S_h = h_v \nabla g_v$$

Dónde:

S_h	[J/m ³ s]	Fuente/sumidero de calor a través de la condensación/evaporación
h_v	[J/kg]	Calor latente de cambio de fase
g_v	[kg/m ² s]	Densidad de flujo de masa (difusión de vapor de agua)

La densidad de flujo de vapor de agua por difusión g_v se calcula con la ecuación de balance de la humedad, en la cual en analogía con la ecuación de balance de calor se puede expresar como sigue:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -(g_w + g_v) + S_w$$

Dónde:

w	[kg/m ³]	Contenido de agua en la capa del material
g_w	[kg/m ² s]	Densidad de flujo de masa (agua líquida)
g_v	[kg/m ² s]	Densidad de flujo de masa (vapor de agua por difusión)
S_h	[kg/m ³ s]	Fuente/sumidero de humedad

El transporte de flujo de agua líquida:

$$g_w = -D_\phi \nabla HR$$

Dónde:

D_ϕ	[kg/ms]	Coeficiente de conducción líquida
HR	[%]	Humedad relativa

El transporte de flujo de vapor de agua por difusión:

$$g_v = -\delta_p \nabla p$$

Dónde:

δ_p	[kg/msPa]	Permeabilidad al vapor de agua de un material de construcción
p_v	[Pa]	Presión parcial de vapor de agua

En definitiva y resumiendo, todas estas ecuaciones anteriormente descritas, pueden ser incorporadas en las dos ecuaciones de transporte que gobiernan el cálculo de esta herramienta y que son las siguientes:

Ecuación de balance de masa:

$$\frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \left(D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi p_{sat}) \right)$$

Ecuación de balance de calor:

$$\frac{\partial H}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla (\lambda_w \nabla T) + h_1 \nabla \left(\delta_p \nabla (HR p_{sat}) \right)$$

Dónde:

w	[kg/m ³]	Contenido de humedad
HR	[-]	Humedad relativa
t	[s]	tiempo
D_ϕ	[kg/ms]	Coefficiente de conducción líquida
δ_p	[kg/(m s) Pa]	Permeabilidad al vapor del material
$p_{v\ sat}$	[Pa]	Presión de saturación
H	[J/m ³]	Entalpía
T	[K]	Temperatura absoluta
λ_w	[W/ (mK)]	Conductividad térmica de un material húmedo
h_1	[J/kg]	Calor latente de cambio de fase

Los parámetros de estas dos ecuaciones están intrínsecamente relacionados a través de la dependencia de humedad de la entalpía total, la conductividad térmica y el término de fuente en la ecuación del balance de masa. Y en el caso de la ecuación del balance de calor, a través de la dependencia de temperatura en el flujo de humedad.

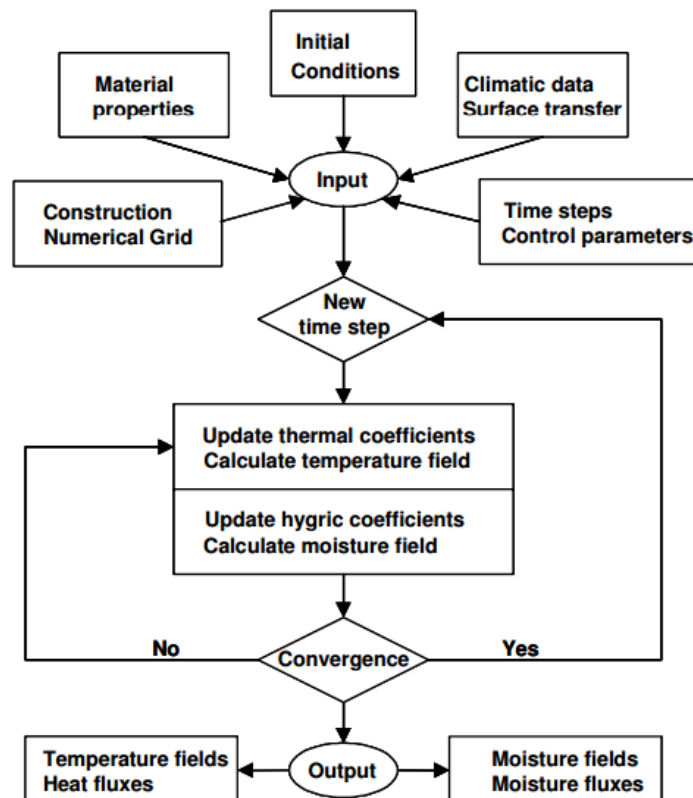


Figura III.27: Diagrama de flujo de la técnica de cálculo en la cual está basada el software WUFI Pro 5.3 (Künzel, 1995)

En la discretización de las ecuaciones de balance se realiza mediante la técnica de volúmenes finitos. En el caso unidimensional, esto dirige a ecuaciones diferenciales que pueden ser resueltas eficientemente mediante el algoritmo de Thomas para matrices tridiagonales.

El procedimiento es resumido en el diagrama de flujo de la figura III.27, donde se observa claramente la secuencia utilizada en la herramienta. Los datos necesarios para incorporar, las decisiones tomadas y las salidas finales del programa.

La incorporación de la cámara de aire de la fachada ventilada en el análisis numérico de simulación Wufi Pro 5.3

Uno de los problemas advertidos en la utilización de este software es la forma de discretizar la cámara de aire. La **ventilación de la cámara** se produce en un movimiento perpendicular a la sección del cerramiento. El programa es una simulación higrotérmica de 1D que trabaja con los procesos de transporte de humedad y calor a través del cerramiento. La forma en la que se ha incorporado al programa es definiendo fuentes y sumideros en la ecuación especificada anteriormente.

Los términos de fuentes para el calor y la humedad S_h y S_w se describen en las siguientes ecuaciones:

$$S_h = \rho_a \cdot c_{p,a} \cdot ACH_{vent} \cdot e \cdot (T_e - T_{vent}) / \Delta x$$

$$S_w = ACH_{vent} \cdot d_{vent} \left(\frac{p_{D,e}}{R_D T_e} - \frac{p_{D,vent}}{R_D T_{vent}} \right) / \Delta x$$

Dónde:

$c_{p,a}$	[J/(Kg.K)]	Capacidad térmica específica del aire
e	[m]	Espesor de la cámara de aire
ACH_{vent}	[s ⁻¹]	Ratio de intercambio de la cámara de aire con el ambiente exterior
p_v	[Pa]	Presión de vapor
R_v	[J/(Kg.K)]	Constante de gas para vapor de agua
T	[K]	Temperatura absoluta
Δx	[m]	Ancho del volumen de control en la zona de ventilación
ρ_a	[Kg/m ³]	Densidad del aire exterior

(e) condiciones de aire exterior

(vent) condiciones en la cavidad

Esta es una forma simplificada del modelo de ventilación en la cámara de aire que ha sido implementado en la herramienta de simulación Wufi Pro. En este caso se asume un impacto homogéneo del exterior en la cavidad sobre la totalidad de altura del cerramiento.

La herramienta de software simulará el comportamiento higrotérmico que la fachada ventilada que ha tenido desde su construcción hasta la actualidad. Se podrá observar con detenimiento cual es el comportamiento higrotérmico de la fachada y cómo influye la humedad en la transmitancia térmica durante esos años y ver en qué sentido la exposición al agua y el comportamiento hídrico de los materiales que forman parte de la fachada condiciona su evolución.

Limitaciones del programa

Las limitaciones del programa pueden organizarse en varios tipos:

Limitaciones por entradas erróneas. Es necesario verificar que la interpretación de los conceptos en el programa es la misma que la que el usuario considera. El conocimiento adecuado sobre el programa y la revisión de los datos introducidos minimiza este tipo de problemas.

Limitaciones por el desconocimiento de datos requeridos. Dada la internacionalidad de la herramienta, se encuentran bases de datos insuficientes, o incluso, los datos de materiales son deficitariamente definidos por las propiedades indicadas. El acceso a fuentes de datos de calidad es de gran importancia para la utilización de este tipo de herramientas. Hay que advertir que los valores pueden estar vinculados a una variedad de métodos, según países, para la realización de los ensayos.

Limitaciones del modelo matemático. Es un proceso de cálculo de una dimensión. Algunas situaciones no pueden ser simplificadas a una sola dimensión como son los puentes térmicos o la humedad ascendente. Los fenómenos de transporte como el flujo de aire en el componente, la admisión de agua bajo presión hidrostática tampoco puede ser calculado. La interface entre dos materiales capilarmente activos se tratan como si fuesen una conducción ideal. Sin embargo, en la realidad, hay una resistencia de transferencia la cual puede reducir el transporte de humedad considerablemente. En este caso se puede resolver poniendo una capa de 1mm de espesor simulando los coeficientes de transporte líquido.

Algunos materiales como la madera y el hormigón son dependientes del historial de contenido de humedad. Este hecho puede contribuir a unas diferencias inapreciables o enormes. El flujo de entalpía resultante del transporte de agua líquida a través del diferencial de temperatura es ignorado.

Para el cálculo, el programa utiliza el método de volúmenes finitos. Este método primero formula las ecuaciones diferenciales en términos de balance de ecuaciones de calor y humedad para luego derivar las ecuaciones algebraicas de tal forma que se asegure que el balance de humedad y calor se mantiene preservado para cada elemento de la red numérica.

Sin embargo, WUFI permite un tiempo de resolución de una hora para sus datos climáticos y limita al usuario a sus propias funciones, ya que no es de código abierto y no se puede añadir ningún módulo al programa.

La **precisión** ha sido verificada por el Fraunhofer Institut Bauphysik en Holzkirchen, de Alemania por numerosos estudios a escala real y de campo durante años. Permite un cumplimiento y una desviación de o no más del 2,5%.

El entorno del programa Wufi Pro 5.3.

El menú del programa. Los menús desplegables

La barra del menú del programa posee una lista de ocho entradas. Cada una tiene su correspondiente menú desplegable y son: proyecto, entradas, ejecutar cálculo, salidas, opciones, base de datos, análisis de resultados e interrogación.

En el caso de la barra de menú entradas, se puede acceder a las pantallas para la incorporación de todos los datos necesarios. En la figura indicada aparecen los ocho apartados que van definiendo todo el cerramiento, sus características y las condiciones que se le van a aplicar a la simulación

En el caso del tercer apartado de ejecutar cálculo se debe indicar la duración de la simulación, para que el programe inicie el cálculo, así como las condiciones en las que la simulación se efectúa, incluso con film. En la barra del menú salidas, se indica la forma en la que se quieren representar los resultados, si gráficamente, en forma de tablas o incluso para exportarlos. Este apartado indica las opciones del programa con respecto a las unidades y sistema, el lenguaje, etc.

El sexto menú desplegable corresponde con bases de datos. El programa recoge un listado de materiales y construcción. Las casas comerciales y/o las distintas bases de datos de centros de investigación son incorporadas al programa para su utilización en la simulación. No obstante, ello no es óbice para la información extraída de ensayos pueda ser introducida al programa.

En el caso de análisis de resultados, se refiere a la pérdida de calor. De este menú desplegable se puede acceder a los cálculos de transmitancia térmica estática con diferentes contenidos de humedad y la transmitancia térmica dinámica. Finalmente en el apartado de interrogación se abre un menú desplegable que hace referencia al conocimiento más exhaustivo que se pueda tener sobre el Wufi Pro.

Datos de entrada utilizados para el comportamiento higrotérmico

Los datos que deben incorporarse dentro del menú entradas. Se organizan en: componente, posiciones de monitoreo, orientación/inclinación/altura, coeficientes de transferencia superficial, interface del material y condiciones Iniciales. En el caso del control, periodos de cálculo/perfiles y parámetros numéricos, clima exterior e interior.

La figura III.28 muestra la representación en sección del muro analizado, donde se dibuja el espesor adecuado. Pinchando en cada espesor se podrá acceder a un menú para la selección del material y sus propiedades.

Las propiedades de materiales necesarias para ser incorporadas al programa se encuentran indicadas en la tabla III.7 y son la densidad, calor específico, conductividad térmica, curva de sorción, almacenamiento de la humedad en función para el vapor, curva de succión, almacenamiento de la humedad en función para el líquido, factor de resistencia a la difusión del vapor de agua y movimiento de la humedad en la fase líquida.

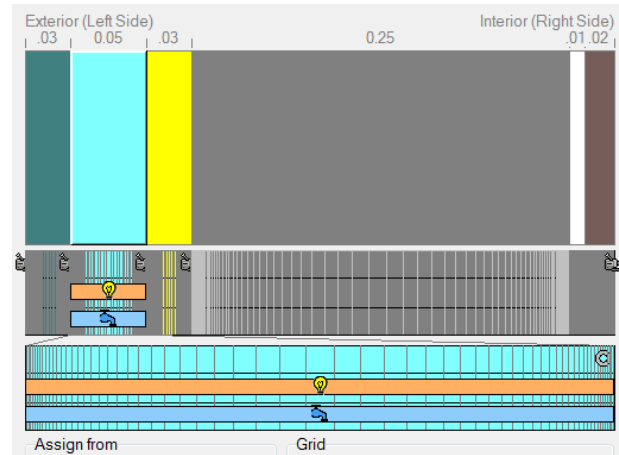


Figura III.28: Menú desplegable de proyecto: posición de monitoreo. Wufi Pro 5.3

Propiedad	Granito	Cámara de aire	Poliuretano	Hormigón w/c=0.5	Mortero Cem-cal	Unidad
(e) Espesor	3/2	5	3	25	1	cm
(ρ) Peso específico	2453	1.3	40	2300	1880	Kg/m ³
(ε) Porosidad	0.095	0.999	0.95	0.18	0.28	m ³ /m ³
(c) Calor específico del material seco	702	1000	1500	850	850	J/(Kg.K)
(λ) Conductividad térmica del material seco	1.66	0.28	0.03	1.6	0.6	W/(m.K)
(μ) Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua	54.0	0.32	50.0	180.0	50.0	-
Curva de adsorción: Referencia de contenido de agua	7.3	S/Tabla	S/Tabla	S/Tabla	S/Tabla	Kg/m ³
Curva de adsorción: Saturación agua capilar libre	50.0	S/Tabla	S/Tabla	S/Tabla	S/Tabla	Kg/m ³
Coeficientes de difusividad hídrica para la succión y redistribución	S/Tabla	S/Tabla	S/Tabla	S/Tabla	S/Tabla	m ² /s

Tabla III.7: Propiedades básicas y complementarias especificadas en WUFI Pro 5.3 y utilizadas en los cálculos de simulación.

En el caso de la transferencia de calor y humedad en la interface del material con el aire, son las siguientes propiedades indicadas en la figura.

Propiedad	Símbolo	Unidad
Resistencia térmica	R	m ² K/W
Espesor equivalente de aire	Sd	m

Coeficiente de absorción solar	α_s	--
Emisividad de la superficie (onda larga y onda corta)		--
Factor de absorción del agua de lluvia		--

Tabla III.8: Propiedades para definir en la superficie interior y exterior del cerramiento

Para colocar estas propiedades de los materiales, WUFI Pro 5.3 ofrece una base de datos extensa de materiales predefinidos como el catálogo de materiales de la Fraunhofer IBP, que cubre prácticamente el espectro en la construcción moderna. En esta figura III.29 se puede ver los test y los métodos para analizar ensayos de materiales y mejorar los datos de entrada para la simulación. En todos los cálculos realizados se han elegido las propiedades de los materiales de las bases de datos recogidos en el programa.

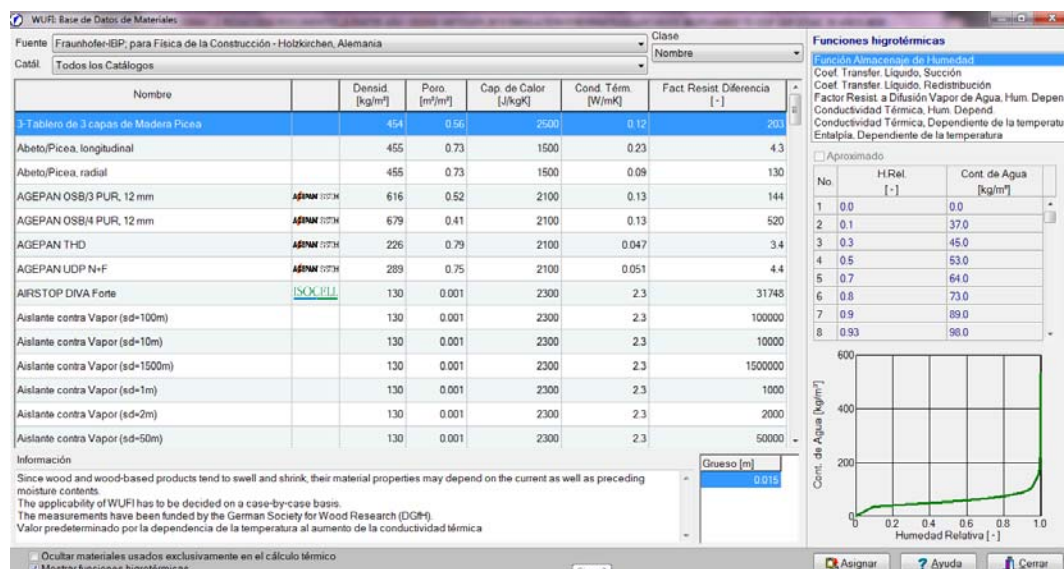


Figura III.29: Menú desplegable de proyecto: posición de monitoreo. Selección de materiales y sus propiedades en bases de datos. Wufi Pro 5.3

Las posibilidades de incorporación de la cámara de aire en el análisis numérico de simulación Wufi Pro 5.3

1. **Como primera acción podría ser ignorar los efectos de ventilación.** Se inserta como una cámara sellada
2. **Se puede colocar una tasa de renovación de aire en la cámara incorporando una fuente de aire** en la capa. Se incorpora además una conductividad térmica efectiva, así como de su factor de resistencia a la difusión de vapor de agua.
Para las simulaciones de los análisis de sensibilidad se ha utilizado 10 renovaciones de aire por hora, (10 renov/h). Para la simulación real de la fachada ventilada de granito se ha calculado y utilizado 857 renov/h.
3. **Usando las condiciones de la cámara de aire como si fuesen las condiciones exteriores.** En este sentido al tener monitorizada la cámara de aire durante un año, estos valores se pueden incorporar al análisis numérico de simulación.

Los datos climáticos exteriores:

Los datos climáticos exteriores son necesarios que sean asignados a las dos caras del muro para llevar así a cabo la simulación. En el caso de los datos climáticos exteriores WUFI Pro 5.3 posee una base de datos climáticos de algunas ciudades del mundo.

Los parámetros necesarios son temperatura de bulbo seco exterior e interior, humedad interna y externa, radiación solar corta y larga, temperatura cielo, precipitación (normal y de lluvia dirigida), velocidad de viento y dirección, presión de vapor, o cualquier otro parámetro de humedad que pueda ser usado para calcular la presión de vapor y presión atmosférica total.

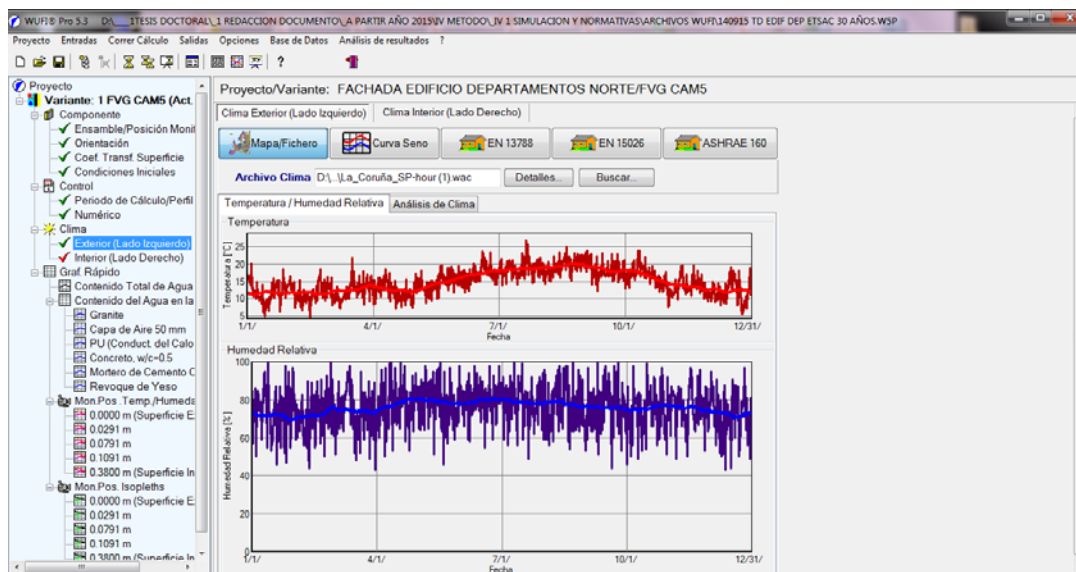


Figura III.30: Menú desplegable del programa Wufi Pro 5.3 donde se observa la elección en el proyecto del clima exterior.

Existen programas que generan archivos de clima. Uno de los más accesibles es el software Meteororm de la compañía suiza Meteotest. Interpola entre las estaciones meteorológicas más cercanas. Los archivos consisten en un año con datos cada hora. Para realizar las simulaciones se ha seleccionado el archivo de A Coruña de este software. Se solicitó a la compañía un fichero con los datos esenciales de un año de la estación de A Coruña SP 43.33º Latitud Norte y -8,42º Longitud Este. Altitud 0 m. Región climática III.2. El programa Meteororm genera un formato de archivo de clima tipo .WAC (WUFI ASCII Climate) necesario para su introducción en el programa y los posteriores cálculos. El periodo considerado de temperatura en el archivo ha sido 2000-2009 y el periodo de radiación entre 1991 a 2010. Estos datos no han suministrado lluvia dirigida. Ésta ha sido incorporada posteriormente como una opción de cálculo disponible en el programa. A continuación en la tabla abajo descrita, se indican los parámetros que son tenidos en cuenta en el archivo.

Símbolo	Concepto	Unidad
ISGH	Radiación global horizontal de onda corta	[W/m ²]
ISD	Radiación global difusa de onda corta	[W/m ²]
CI	Índice de cobertura de nubes	[-]
TA	Temperatura ambiental	[°C]
HREL	Humedad relativa	[%]
WS	Velocidad de viento	[m/s]
WD	Dirección de viento	[°] Nord=0
RN	Precipitación normal	[mm/h]
ILAH	Radiación atmosférica de onda larga	[W/m ²]

Tabla III.9: Datos suministrados en el archivo de Meteonorm .WAC durante un año para incorporar al programa WUFI Pro 5.3.

Además de la utilización de este archivo obtenido del software Meteonorm, se ha procedido también a la incorporación de datos reales obtenidos in-situ de la monitorización realizada en la fachada ventilada durante el año 2008-2009.

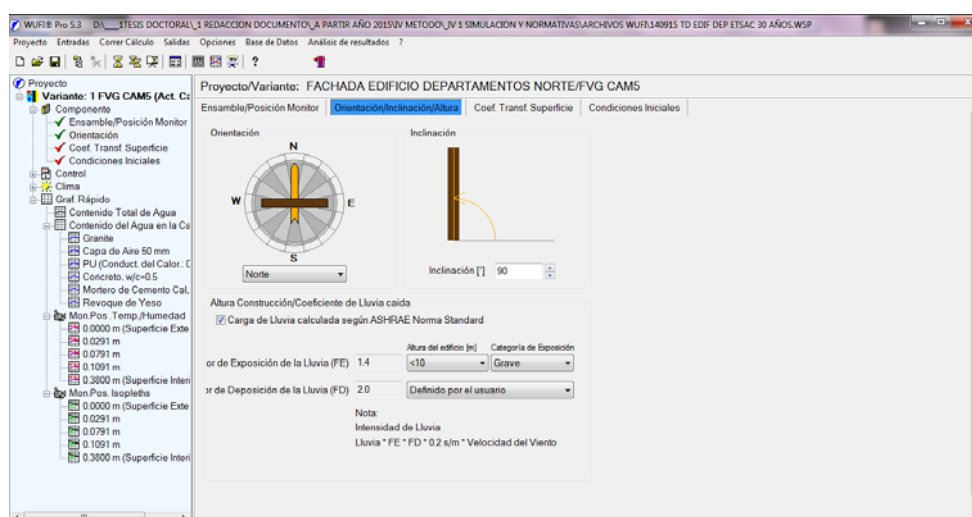


Figura III.31: Menú desplegable de proyecto. Componente. Orientación, inclinación, altura. Wufi Pro 5.3

Datos climáticos interiores:

La pantalla de datos climáticos interiores abre un menú de pestañas en el que se puede elegir el cálculo atendiendo a alguna de estas condiciones según el estándar EN 13788:2002, según el estándar EN 15026:2007, según el estándar ASHRAE 160P y a través de curvas sinusoidales definidas por el usuario. Finalmente deja también la posibilidad de incorporar un archivo de clima interior obtenido de monitorizaciones. Para los cálculos se ha incorporado el archivo de temperatura y humedad relativa. También se han hecho cálculos aplicando el estándar EN 15026:2007 con alta humedad.

La transmitancia térmica (valor-U) y estándares de cálculo

Para el cálculo de la transmitancia térmica estacionaria se ha tenido en cuenta lo prescrito en UNE EN ISO 6946:2007. Para el cálculo de transmitancia térmica mensual se ha utilizado el procesador posterior incorporado.

Procedimiento seguido

Durante el primer paso se trató de minimizar las limitaciones obtenidas por un posible desconocimiento de los datos requeridos. Para ello, se realizaron unos análisis de sensibilidad previos de la variación higrotérmica que supondría incorporar al programa diferentes valores característicos para un mismo material del cerramiento en la capa. El fin es conocer de antemano el efecto producido por las variaciones de un parámetro estimando los resultados.

Para la definición del rango de variación de los parámetros, se muestra la tabla siguiente que recoge el rango de valores utilizados atendiendo a la bibliografía consultada.

Propiedad	Granito	Fuente:	Espuma Poliuretano	Fuente:	Hormigón	Fuente:	Unidad
(ρ) Peso específico	[2500-2700]	EN 12524	[22-55]	EN 12524	[1800-2200] 2400	EN 12524	Kg/m ³
			31,9	Marechal Kiesl, Gertis	[2250-2270]	Marechal, Kiesl, Gertis	
(ε) Porosidad	0.095	Rojo Alonso	0.96	Marechal	0.153	Marechal	m ³ /m ³
(c) Calor específico del material seco	1000	EN 12524	1400	EN 12524	1000	EN 12524	J/(kg.K)
			1400	Marechal	940	Marechal	
(λ) Conductividad térmica del material seco	2.8	EN 12524	0.0248	Marechal 10°C	[2.3-2.5]	EN 12524	W/(m.K)
			0.05	EN 12524	1.42	Kiesl, Gertis	
(μ) Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua	10000	EN 12524	60.0	EN 12524	130.0	EN 12524	-

Tabla III.10: Variación de valores según referencias

Una vez averiguado los comportamientos debidos a las variaciones de las características de los materiales, se procedió a iniciar los análisis de sensibilidad.

El programa de simulación fue utilizado para realizar los análisis de sensibilidad del cerramiento organizados en tres tipos de parámetros: ambientales, relativos a materiales y tiempo.

En el caso del análisis de sensibilidad de parámetros ambientales, se analiza diferentes zonas climáticas, orientación y lluvia incidente. En el caso de los materiales, se estudió el poliuretano, granito, cámara de aire, hormigón y su contenido de humedad. Finalmente se hizo un estudio a lo largo del tiempo. En el caso del parámetro del tiempo, se evaluó el deterioro producido por la sollicitación hídrica en estos 20 años de antigüedad de la orientación norte de la fachada ventilada del Edificio de Departamentos de la ETSAC, desde que fue construida la fachada, año

1995 hasta el día de hoy. Este deterioro también será importante para conocer valor U del cerramiento.

Potenciales de salida

De los análisis de sensibilidad realizados, han sido utilizados para la obtención de resultados los siguientes parámetros:

- Contenido total de agua del cerramiento en kg/m^2 a lo largo de la duración de la simulación. Se han realizado gráficas propias a partir de las tablas exportadas del programa.
- Contenido de agua de cada una de las capas que posee el cerramiento a lo largo del tiempo en kg/m^3 . Se han realizado gráficas propias.
- Densidad de tasa de flujo de calor en la cara exterior y en la cara interior en W/m^2 , así como los de la densidad de flujo de masa (humedad) $\text{g/m}^2\text{s}$. Se han realizado gráficas propias.
- Finalmente se han recogido las transmitancias térmicas mensuales, de varias de las simulaciones efectuadas.

Con estos resultados recogidos y de forma comparada, se ha procedido a su interpretación para evaluar el desempeño higrotérmico y en particular:

- Tiempo de secado de la humedad en el cerramiento
- Problemas de condensación
- Problemas de absorción de agua debido a la lluvia dirigida (WDR)
- Influencia de humedad en el rendimiento térmico
- El comportamiento del sistema a largo plazo o consecuencias higrotérmicas de modificaciones de construcción.

Contenido de humedad total en el elemento constructivo a lo largo del periodo de análisis y en cada capa del elemento constructivo a lo largo del periodo de análisis.

Variación de la temperatura y humedad relativa a lo largo del tiempo

III.3 ANÁLISIS DE DATOS

Tratamiento de datos para la obtención de la transmitancia térmica o valor U

Para el análisis y tratamiento de datos se ha seguido el procedimiento establecido en la ISO 9869, así como lo indicado en Rhee-Duverne y Baker (2013). Una vez recogidos los valores de densidad de tasa de flujo de calor, la norma ISO 9869:2014 define dos métodos para el tratamiento de los datos y obtención del valor de transmitancia térmica.

*“El llamado **método promedio o de la media**, que es simple, o el **método dinámico**, que es más sofisticado, pero que da una criterios de calidad de la medición y puede acortar la duración de la prueba por medio de elementos pesados sometidos a temperaturas interiores y exteriores variables.”*

“El método promedio asume que la conductancia o la transmitancia se pueden obtener dividiendo la densidad media de la tasa de flujo de calor por la diferencia de temperatura media, la media se toma durante un período suficientemente largo de tiempo.”

“Cuando la estimación se calcula después de cada medición, se observa una convergencia a un valor asintótico. (...) Si no se cumplen estas condiciones, se pueden obtener resultados erróneos.”

Para este caso del ensayo, se ha elegido la fachada ventilada de granito norte que no tiene radiación solar directa y se evite la recogida de datos errónea. Debido a la configuración del cerramiento, éste posee un muro de hormigón de 24cm, pudiéndose clasificar en cerramiento con elementos pesados. En este sentido la norma indica expresamente cuando puede acabarse la monitorización:

*“Para los elementos más pesados, que tienen un calor específico por unidad de superficie de más de $20 \text{ kJ} / (\text{m}^2 \text{ K})$, se recomienda que el análisis que se lleve a cabo durante un período que es un múltiplo entero de 24 h. **El ensayo se terminará sólo cuando se cumplan las siguientes condiciones:***

- *La duración de la prueba es superior a 72 h;*
- *El valor de R obtenido al final de la prueba no se desvíe en más de $\pm 5\%$ del valor obtenido 24 horas antes;*
- *El valor de R obtenido mediante el análisis de los datos del primer período de tiempo durante el INT ($2 \times D_T / 3$) d no diferirá en más de $\pm 5\%$ a partir de los valores obtenidos a partir de los datos del último período de la misma duración. D_T es la duración de la prueba en días; INT es la parte entera;*
- *Si el cambio en el calor almacenado en la pared es más de 5% del calor que pasa a través de la pared durante el período de prueba, uno de los métodos descritos en 7.2 o en el anexo B deberá ser utilizado.”*

Efectos de almacenamiento debido a cerramientos pesados

Para la consideración de los cerramientos pesados y la aplicación del método de la media, se ha seguido el procedimiento de realizar los cálculos de los factores correctores por masa.

“En el siguiente procedimiento, relevante para estructuras de alto valor R y alta masa térmica, se aplicará (...). El uso de este procedimiento de corrección a menudo permite un tiempo de medición más corto de lo que sería necesario para cumplir con estos criterios (...).

El procedimiento implica

- *El cálculo de los factores internos y externos térmicos de masa (F_i y F_e , respectivamente) para la estructura de que se trate;*
- *Un ajuste, con la participación de estos factores, medida del flujo en cada punto de toma de datos.”*

Corrección del flujo de calor medido por almacenamiento

Los factores obtenidos para la corrección se han utilizado para la obtención del valor de densidad de tasa de flujo de calor corregido.

No se aplica corrección a los datos durante las primeras 24 h. A partir de entonces, $\sum q_j$ en las fórmulas de transmitancia térmica se sustituye por:

$$\sum q_j - \frac{(F_i \delta T_i + F_e \delta T_e)}{\Delta t}$$

En donde

Δt es el intervalo entre las lecturas, en segundos;

δT_i es la diferencia entre la temperatura promedio interno sobre la 24 h antes de la lectura y la temperatura promedio interna promedio durante las primeras 24 h del período de análisis;

δT_e es la diferencia entre la temperatura promedio externa promedio durante las 24 h antes de la lectura j y la temperatura promedio externa promediada sobre las primeras 24 h del período de análisis.”

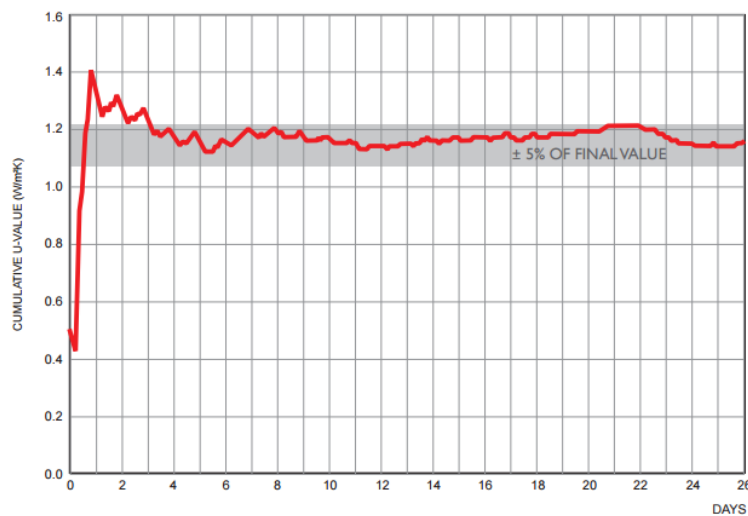


Figura III.32: Efecto de incrementar el periodo de monitoreo Duvener y Baker (2013)

Interpretación de los resultados

En este sentido la norma detalla los problemas que hayan podido surgir si los valores obtenidos entre el cálculo y la medida difieren en más de un 20%. A continuación se exponen las posibles causas:

Comparación de los valores calculados y medidos

Diferencias significativas (> 20%) entre el valor calculado y la medición de R-o valor U pueden ser causados por una combinación de cualquiera de los siguientes factores:

- **Los valores asumidos por las conductividades térmicas no son los verdaderos valores.** Esto puede deberse a una incorrecta identificación de los materiales, especialmente los aislantes, de las diferencias entre las propiedades reales del material y los valores asumidos, **o de efectos de la humedad;**
- Los valores asumidos por las resistencias superficiales no son los verdaderos valores. Esta fuente de error suele ser importante sólo para los elementos de mal aisladas;
- Los espesores exactos de las capas, especialmente las hechas de materiales aislantes, no se midieron adecuadamente;
- Las medidas de R-o valor U no se llevaron a cabo correctamente o se realizaron bajo pobres condiciones térmicas;
- el examen del elemento y las mediciones de R- o valor U no se aplica a la misma ubicación en un elemento no homogénea;
- Las líneas de flujo de calor durante la medición no eran rectas y perpendiculares al elemento;
- Hubo flujos de aire de convección en el elemento, que influyó en las mediciones de R o valor U, pero no se tuvieron en cuenta en el cálculo del valor teórico;
- **Hay cambios de fase, tales como congelación, descongelación, condensación o evaporación de agua o humedad;**
- Las temperaturas (ambiente) ambientales utilizados para el cálculo del valor U no son los medidos (ver Anexo A).

Todas estas fuentes de error, se tendrán en cuenta en la interpretación de la comparación de los resultados dados por el cálculo y medición.

Análisis del error e incertidumbre

La incertidumbre de los valores U estimados se derivan de la incertidumbre de los valores individuales y de la desviación estándar del valor medio. La incertidumbre total del valor-U estimado, δU , se calcula como el valor de la raíz cuadrada de las desviaciones de cada error y la desviación estándar:

$$\delta U = \sqrt{\left(U - U_{errQ}\right)^2 + \left(U - U_{errTi}\right)^2 + \left(U - U_{errTe}\right)^2 + (s.d.)^2}$$

Donde U_{errQ} , U_{errTi} , U_{errTe} , son los valores U calculados aplicando los errores debidos al flujómetro, temperatura interna y temperatura externa respectivamente.

Estimación de la incertidumbre

	Causa	Descripción	Acciones correctivas	Incertidumbre típica
Medida	No uniformidad del flujo de calor y la temperatura	No es un flujo unidimensional debido a: -La no homogeneidad de las estructuras -La no uniformidad de las estructuras -La no uniformidad térmica (radiación)	-Investigaciones preventivas de termografía para evitar instalar sensores cerca de los puentes térmicos -Incrementar la superficie de los medidores de flujo de calor -Repetición de las medidas en varias posiciones	1-5%
	Inestabilidad de temperatura y flujo de calor	Régimen no estacionario debido a: -Variaciones climáticas ext. -Variaciones climáticas int. -Variaciones en h_i y h_e (debido a la velocidad de aire)	-Periodo de ensayo suficiente (72h) -Bajas variaciones térmicas durante el ensayo -Medidas directas de conductancia en vez de valor U -Control de las condiciones interiores	5-10% a
	Resistencia del medidor del flujo de calor	Influencia del medidor en superficie y en el campo térmico del muro	-Corrección en la base del valor de la resistencia térmica declarada por el fabricante y el medidor de flujo de calor sin la superficie -Desensibilización (uso de medidores de flujo con protector térmico y baja resistencia) -Compensación de medidas instalando sensores de temperatura bajo la superficie plana	2-3% a
	Resistencia de contacto	Influencia del contacto térmico del medidor debido a: -La no planeidad del muro -El acabado superficial del muro -La presión de contacto	-Uso de pastas conductoras térmicas y cinta adhesiva -Lijado en la superficie	2-5% a
Cadena de medida	Sensor de temperatura	-Linealidad del sensor y sensibilidad -Deriva del sensor (envejecimiento)	-Altas diferencias de temperatura (i.e. 10-15°C) -Calibración frecuente de sensores de temperatura	0.1-0.2 °C
	Medidor de flujo de calor	-Linealidad del sensor y sensibilidad -Deriva del sensor (envejecimiento)	-Flujos altos -Calibración frecuente de los medidores de flujo de calor	1-2% F.S.
	Convertidor??	-Resolución del convertidor -Deriva del convertidor -Transmisión de datos	-Calibración del recogedor de datos -Control de transmisión de datos	1-2%
Ambiente (parámetros que influyen)	Temperatura	-Influencia en los componentes electrónicos y en los medidores de flujo de calor planos	-Posicionado de los recogedores de datos de flujo en ambientes controlados	1-2%
	Radiación solar	-Influencia en los flujos de calor y en los termo-elementos de flujos radiactivos externos (radiación solar) e internos (luz)	-Sombras de temperatura y sensores de flujo de calor debido a la radiación solar y otras influencias. -Posicionamiento del medidor de flujo de calor plano en la superficie interior	
	Humedad	-Influencia del contenido de humedad debido a la condensación intersticial, humedad ascensional y filtración de fuertes lluvias	-Adecuada selección y protección de superficies exteriores	

a: Valor máximo estimado de acuerdo a la norma ISO 9869; este valor no puede ser frecuentemente garantizado en climas moderados.

Tabla III.11: Incertidumbres de valores U extraídos in situ y sus acciones correctoras (Ficco et al, 2015)

La incertidumbre de los valores estimados U son de aproximadamente el 10%, pero el nivel de incertidumbre se incrementa a medida que la diferencia de temperatura se hace pequeña. En este caso, la elección de los meses más fríos de diciembre y enero en la monitorización, se corresponde con las épocas de mayores saltos térmicos anuales entre el interior de un edificio y el exterior y así minimizar el error de medida.

Tratamiento de otros datos

Para la descripción de valores obtenidos de temperatura, humedad relativa y densidad de tasa de flujo de calor en la monitorización se utilizará la estadística descriptiva. Se indicarán los parámetros estadísticos de media, desviación típica, varianza, desviación estándar, máximo, mínimo, rango, rango intercuartil y los percentiles 20, 50 y 75.

En cuanto a la representación de los resultados y con el fin de observar el comportamiento higrotérmico a lo largo del tiempo, se utilizarán las gráficas de eje x temporal con respecto al eje y , parámetro a evaluar: temperatura, humedad relativa, contenido de agua, presión de vapor, densidad de tasa de flujo de calor y transmitancia térmica. Es importante este tipo de representaciones pues supone entender el comportamiento del cerramiento con respecto a la variabilidad temporal, tanto anual como diaria.

Para la comparación entre variables se harán diagramas de barras que evalúen porcentajes. En relación con la comparación entre valores simulados y monitorizados se utilizará diagramas de dispersión donde se puedan conocer el tipo de relación entre las dos variables. La situación ideal supondría que los puntos estuviesen coincidiesen todos en una misma recta. Se utilizará también tablas indicativas de correlaciones de Pearson.

Finalmente se ha considerado utilizar también la técnica estadística de regresión lineal para conseguir, no sólo una relación entre variables, sino también para poder predecir un comportamiento. Esta técnica permite estudiar la relación que se puede establecer en una variable dependiente con respecto a dos o más variables predictoras o independientes. Esta técnica estadística tiene dos finalidades. La primera es conocer en qué medida la variable dependiente está explicada por las independientes y en segundo lugar obtener las predicciones de la variable dependiente a partir de las variables independientes. En el caso de dar respuesta a la hipótesis, esta técnica estadística se ha considerado adecuada.

III.4 RESUMEN DEL CAPÍTULO III

A lo largo del capítulo III de diseño de investigación y desarrollo del trabajo, se procedió a desarrollo del objetivo de elegir y describir los procedimientos seguidos para la evaluación del comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada de granito orientada al norte.

En la **primera parte del capítulo III** se hizo una introducción de la importancia de la aproximación holística de la investigación, recordando y explicando con detenimiento las tres preguntas de investigación efectuadas en la tesis doctoral. Se han justificado también los métodos elegidos que pudiesen dar una respuesta a esas preguntas.

La **segunda parte** se centró en describir estos métodos empleados. Se ha cumplido el objetivo específico de detallar el método para la obtención de datos in-situ mediante monitorización. En concreto, se ha pormenorizado el proceso de monitorización térmica e hídrica anual y de la densidad de tasa de flujo de calor para el cálculo de la transmitancia térmica. Se han descrito y justificado el tipo de instrumentación elegida, así como los procedimientos seguidos para la obtención de datos in-stu.

En segundo lugar, se ha detallado y justificado el tipo elegido de modelo de análisis numérico matemático de calor y humedad y su aplicación a través del software concreto: Wufi Pro 5.3 para la obtención de resultados. Se ha descrito el funcionamiento del programa y los tipos de resultados

En la **tercera parte** se ha indicado la forma de comparación de los dos datos obtenidos, el de la realidad y el calculado mediante la utilización de estadística descriptiva y del análisis de regresión lineal.

Este conjunto de procedimientos permitirán obtener resultados con la finalidad de dar respuesta a las tres preguntas de investigación planteadas.

III.4 SUMMARY OF CHAPTER III

Throughout chapter III the objective of choosing and describing the procedures followed for assessment of the hygrothermal behavior of the open-joint ventilated façade of granite oriented to the north was presented.

In the **first part of chapter III** an introduction of the importance of holistic approach of research was made, recalling and explaining in detail three research questions. Methods were chosen to answer these questions. Selection of these methods was also justified.

Second part of chapter III focused on describing these methods applied. Specific objective of detailing the method for in-situ data collection through monitoring has been met. In particular, annual thermal and water monitoring process and heat flux density have been detailed. Types of instrumentation chosen has been described and justified, as well as procedures followed for obtaining in-situ data.

In order to obtain results, mathematical numerical analysis of heat and humidity and its application through specific software Wufi Pro 5.3 has been detailed and justified. Program operation and results have been described

The **third part** has indicated the way of comparing two data obtained that of reality and that calculated using descriptive statistics and linear regression analysis.

In order to answer the three research questions raised, these set of procedures will implement at the following chapters.

IV

RESULTADOS DE MONITORIZACIÓN “IN SITU”

« Por más que la naturaleza empiece por la razón y termine en la experiencia, nosotros debemos seguir la marcha contraria; es decir, empezar por la experiencia y con ella investigar la razón. »

Leonardo da Vinci

En el capítulo III de diseño de investigación y desarrollo del trabajo se definió con detalle el procedimiento seguido para responder a las preguntas de investigación. En este capítulo IV se da aplicación, concretamente al método de monitorización in-situ y se exponen los resultados que se han obtenido. Estos resultados son determinantes para argumentar el **objetivo general** de este capítulo que es, en síntesis, valorar el comportamiento higrotérmico real del sistema constructivo de la fachada ventilada de granito con localización y orientación concreta.

Además y al mismo tiempo, el capítulo también da respuesta a los **objetivos específicos** indicados a continuación.

- . El primero es describir adecuadamente el clima recogido en la localización, y en relación a los valores normales de A Coruña y el comportamiento de la fachada.
- . En segundo lugar, conocer y cuantificar, mediante monitorización, la exposición hídrica-ambiental y de la densidad de tasa de flujo de calor de la fachada ventilada real elegida.
- . Finalmente correlacionar la exposición hídrica-ambiental con el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor y el conocimiento de la transmitancia térmica

Para elaborar los resultados que dan respuesta a estos objetivos, fueron realizadas tres campañas de monitorización *in situ*. Estas campañas utilizaron el cerramiento de la fachada ventilada de granito orientada al norte del edificio de departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña descrita en el capítulo anterior. La primera tuvo lugar durante un año, entre mayo del 2008 a mayo del 2009, donde se recolectó temperatura ambiental y humedad relativa del exterior, de la cámara de aire y del ambiente interior. La

segunda, en la misma fachada, se hizo una recogida de datos de temperatura y humedad relativa ambiental exterior, de la cámara e interior entre febrero y marzo del 2016. Además, esta vez, se dispusieron sensores de densidad de tasa de flujo de calor. La tercera y última campaña de monitorización, fue realizada un año después en 2017, donde se volvió a repetir la misma recogida de datos, pero esta vez reduciendo el número de sensores de flujo dispuestos.

Para organizar y presentar la información, el capítulo cuarto se ha **estructurado** en cinco partes. En el primer apartado se explica los resultados obtenidos de las monitorizaciones higrotérmicas ambientales realizadas en el cerramiento de fachada ventilada de granito orientada al norte, teniendo como subapartados el térmico y el de humedad relativa. El segundo apartado es donde se analizan los resultados de la exposición hídrica, en concreto de la presión de vapor y los movimientos de vapor de agua en el cerramiento. El apartado tercero y cuarto se exponen los resultados obtenidos de la medición de las temperaturas superficiales, de la densidad de tasa de flujo de calor y el cálculo de la transmitancia térmica. Finalmente el capítulo quinto remata con una síntesis crítica de resultados recogidos.

IV.1 MONITORIZACIÓN HIGROTÉRMICA

El clima es determinante para conocer como interviene éste en el comportamiento de los cerramientos. Las variaciones de temperatura, precipitación y humedad relativa, entre otros parámetros, influye en gran medida. En concreto, y como se vio anteriormente, en el paso de la densidad de tasa de flujo de calor a través de los cerramientos se ve influenciado por el contenido de humedad de los materiales que conforman el cerramiento de fachada ventilada y de la cámara de aire. Por tanto, el conocimiento del ambiente en el que se dispone el sistema constructivo será muy importante.

Tal y como se dijo, el objetivo específico de esta parte trata de recoger fidedignamente cómo es el ambiente exterior, interior y también de la cámara de aire y describir adecuadamente el clima de la localización, incluso en relación a los valores normales de A Coruña y su influencia en el comportamiento de la fachada.

Para desarrollar este apartado se hicieron varias preguntas, separando el aspecto térmico y el hídrico. En relación al térmico se planteó responder:

- . ¿Cuál es el comportamiento térmico del ambiente exterior anual de monitorización?, ¿cómo son las amplitudes térmicas?, ¿representa el año monitorizado los valores normales?
- . ¿Cuál ha sido la tendencia del comportamiento térmico de la fachada?, ¿amortigua térmicamente la cámara ventilada del cerramiento?
- . ¿Qué características desde el punto de vista térmico ha tenido la monitorización de febrero y marzo del 2016?

En relación al aspecto hídrico:

- . ¿Cuál es el comportamiento hídrico del ambiente exterior anual de monitorización?, ¿existe alta humedad relativa en el exterior?, ¿representa el año de monitorización los valores normales?
- . ¿Cuál ha sido la tendencia del comportamiento hídrico de la fachada?, ¿empeora la cámara ventilada la humedad relativa con respecto al exterior?, ¿la humedad absoluta en la cámara es superior?

Se expone a continuación los resultados obtenidos en cada ámbito, el térmico y el hídrico, con un pequeño resumen final con los aspectos más destacados.

IV.1.1 COMPORTAMIENTO TÉRMICO

La primera de las preguntas que se podrían realizar es si este año que se ha monitorizado en el lugar donde se sitúa la fachada ventilada de granito ha sido representativo del clima que “normalmente” tiene A Coruña.

Para dar respuesta a ello, se representa en la figura IV.1 temperatura media mensual exterior del año monitorizado en la fachada ventilada de granito orientada al norte. No ha existido mucha diferencia térmica entre los valores recogidos ese año **de la temperatura en el ambiente exterior** y los valores normales de A Coruña (valores estadísticos de 25 años registrados).

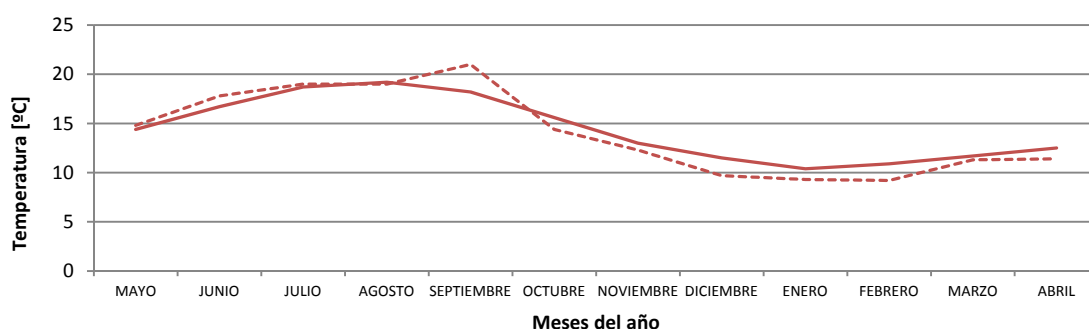


Figura IV.1: Temperatura media mensual exterior del año monitorizado al lado de la fachada ventilada de granito orientada al norte (discontinua) y valores normales de la localización de A Coruña (línea) (mayo 2008, abril 2009)

Se puede observar en la figura IV.2 la oscilación térmica anual y diaria obtenida de los valores horarios registrados. En este año monitorizado se han detectado valores puntuales que han superado los 30 °C, así como valores inferiores cercanos a 2°C.

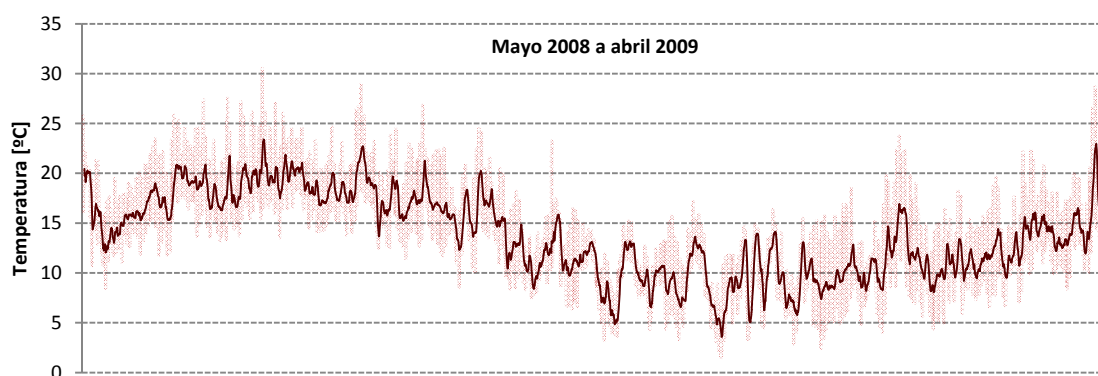


Figura IV.2: Temperatura exterior horaria al lado de la fachada ventilada de granito orientada al norte durante el año de monitorización (mayo-2008, abril 2009)

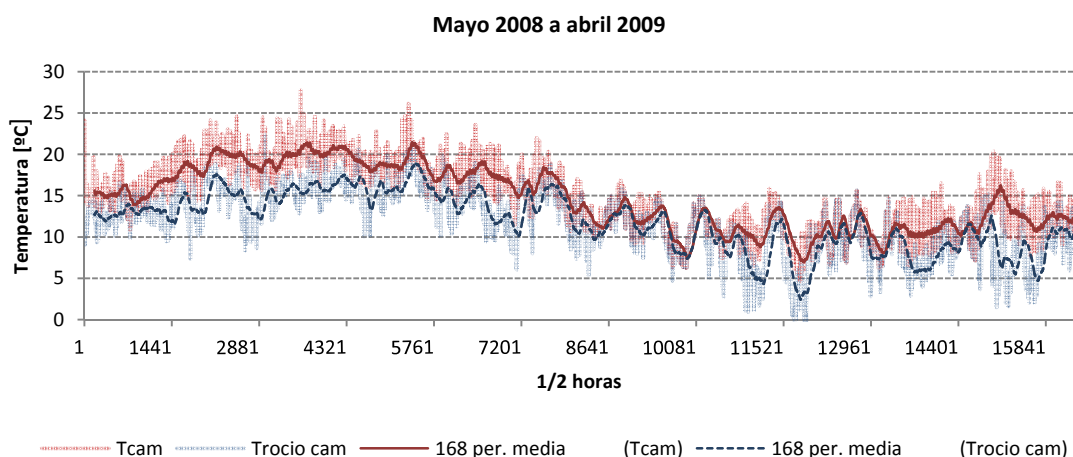


Figura IV.3: Temperatura en la cámara (rojo) y temperatura de punto de rocío en la cámara (azul) en °C (eje vertical) durante mayo-2008 a abril 2009.

La temperatura en la cámara y el punto de rocío. En la figura V.3 se muestra la media semanal (168h) de todos los valores recogidos de temperatura de la cámara y de rocío en el año. Se observa que los periodos de otoño e invierno de menor temperatura, la temperatura de rocío y la temperatura ambiental están muy cercanos. Por el contrario, las épocas con las temperaturas más altas, como junio, julio, agosto y septiembre del 2008 la diferencia entre la temperatura ambiental y la del rocío ha sido mayor.

Representado mensual y trimestralmente los datos recogidos de **temperatura ambiente y de la cámara** se puede observar cuál ha sido el comportamiento con mayor precisión.

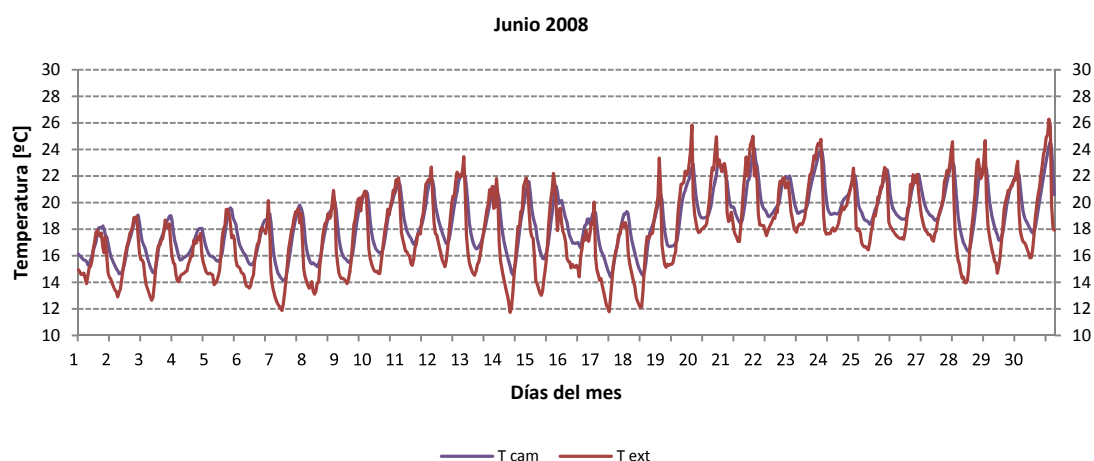


Figura IV.4: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de junio del 2008.

Los datos recogidos de las monitorizaciones del mes de junio del 2008 y mostrados en la figura IV.4 revelan que los valores de temperatura ambiental exterior tienen una mayor oscilación, sobre todo por la noche. Este comportamiento tiene su influencia en la cámara ventilada. Aquí la cámara amortigua los valores mínimos de temperatura exterior. Los valores más elevados de temperatura son aproximadamente similares y la caída de temperatura en la cámara hace poseer valores más elevados que el exterior. Se puede deducir de esta figura que en junio la cámara produce una amortiguación para los valores mínimos de temperatura.

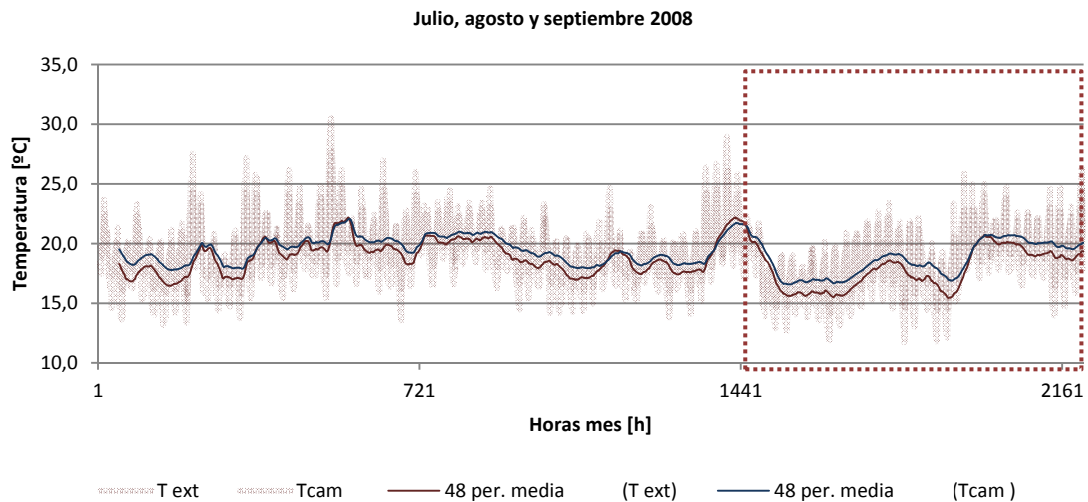


Figura IV.5: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de julio, agosto y septiembre del 2008.

Si representamos las temperaturas medias durante julio, agosto y septiembre del 2008 se observa que la gráfica de la temperatura media de la cámara está siempre ligeramente por encima de la del exterior. También se revelan momentos en los que la tendencia del valor semanal de la temperatura exterior (rojo) y de la cámara son casi iguales como es el caso de finales de julio o finales de agosto y principios de septiembre.

A continuación en la figura IV.6 se muestra el comportamiento de la temperatura exterior y de la cámara en el mes de septiembre del 2008.

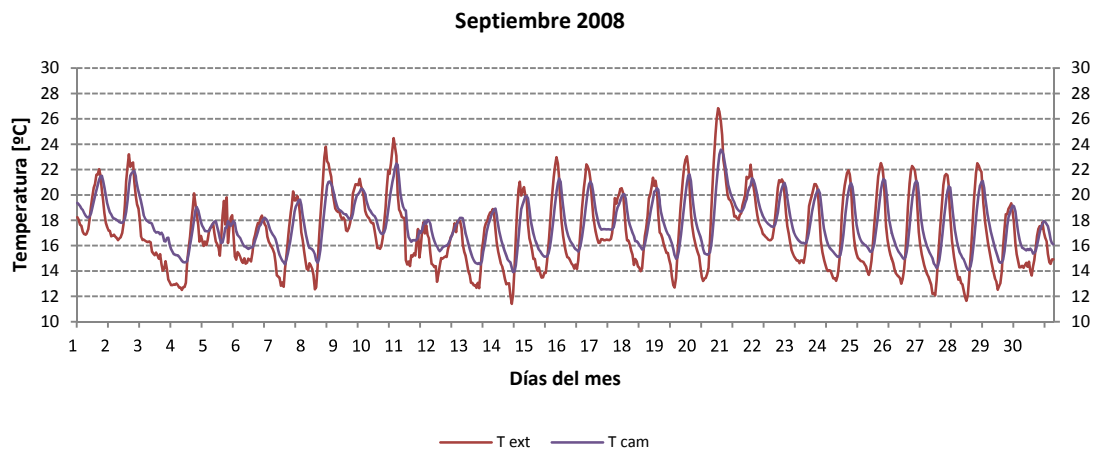


Figura IV.6: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de septiembre del 2008.

En concreto en el mes de septiembre del 2008, se percibe que desde el día 5 y hasta aproximadamente el 10 de septiembre los valores han sido menos oscilatorios. Sin embargo, la oscilación de la temperatura ambiental exterior y de la cámara sigue el mismo comportamiento que en los meses precedentes. La temperatura de la cámara amortigua la temperatura del exterior y aquí se advierte que las temperaturas máximas son ligeramente superiores en el ambiente exterior, cosa no tan evidente en el mes de junio del 2008.

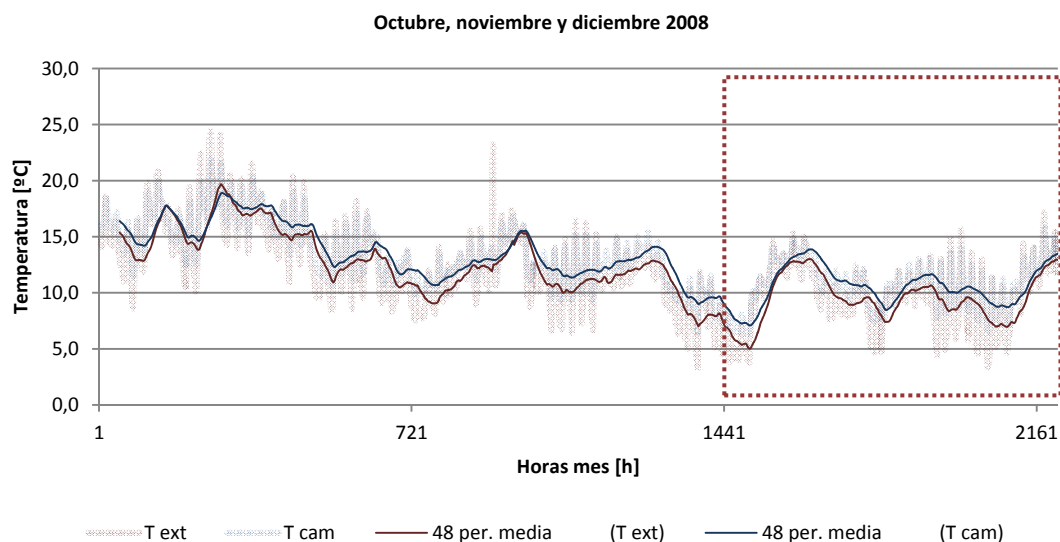


Figura IV.7: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de octubre, noviembre y diciembre del 2008.

En el siguiente trimestre de octubre, noviembre y diciembre del 2008, y representados la media (48h) de temperaturas, se advierte que ciertos días del mes de octubre e inicio de diciembre, la temperatura ambiental (roja) está próxima a la de la cámara (azul). Ha empezado a bajar la temperatura exterior y al mantenerse la interior en aproximadamente 20°C, la temperatura de la cámara acompaña al alza la gráfica de la temperatura exterior.

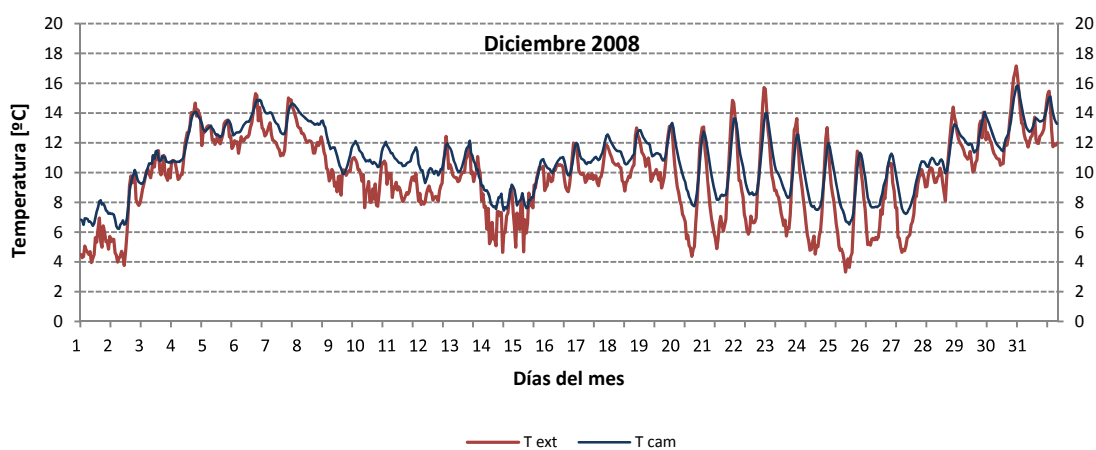


Figura IV.8: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de diciembre del 2008.

Puede observarse de la figura IV.8 cómo se desarrollan diariamente y durante el mes de diciembre del 2008, las oscilaciones de temperatura. Se advierte una tendencia de mayor temperatura en la cámara diariamente hasta el 19 de diciembre. A partir de esa fecha las oscilaciones muestran que en las horas con mayor valor, la temperatura del ambiente exterior y de la cámara son muy similares. Una vez que la temperatura el ambiente exterior empieza a bajar, se produce un amortiguamiento del valor, manteniendo valores más altos en la cámara.

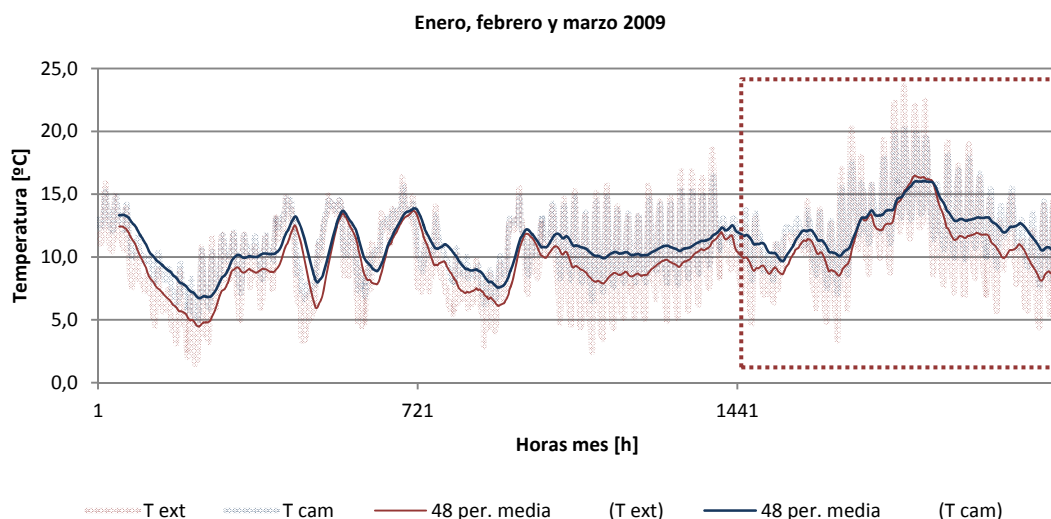


Figura IV.9: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de enero, febrero y marzo del 2009.

El siguiente trimestre de enero, febrero y marzo del 2009, la media (48h) de la temperatura de la cámara es también superior a la del exterior monitorizado. A finales de enero y a principios de marzo, los valores tienden a igualarse.

Analizando el mes de marzo del 2009, se detecta que hasta el día 10 la temperatura de la cámara (azul) ha sido superior a la del ambiente exterior (roja).

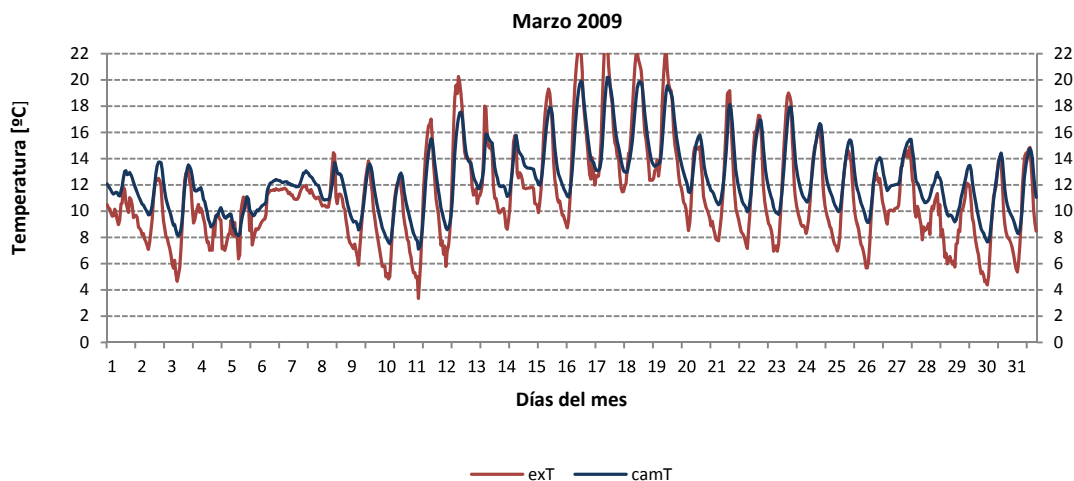


Figura IV.10: Temperatura del exterior (roja) y de la cámara (azul) en el mes de marzo del 2009.

A partir de este día el comportamiento es claramente sinusoidal, en algunos casos amortiguando la cámara tanto el valor de temperatura exterior máxima como la mínima (del 16 al 20) y en otros casos sólo el valor mínimo (21 al 25). Otro comportamiento ha sido también el mayor valor de la temperatura de la cámara que la del exterior (27 a 31).

Finamente el mes de abril del 2009, se detecta que existe una tendencia a que el valor de la temperatura de la cámara sea superior a la del ambiente exterior, con menor oscilación.

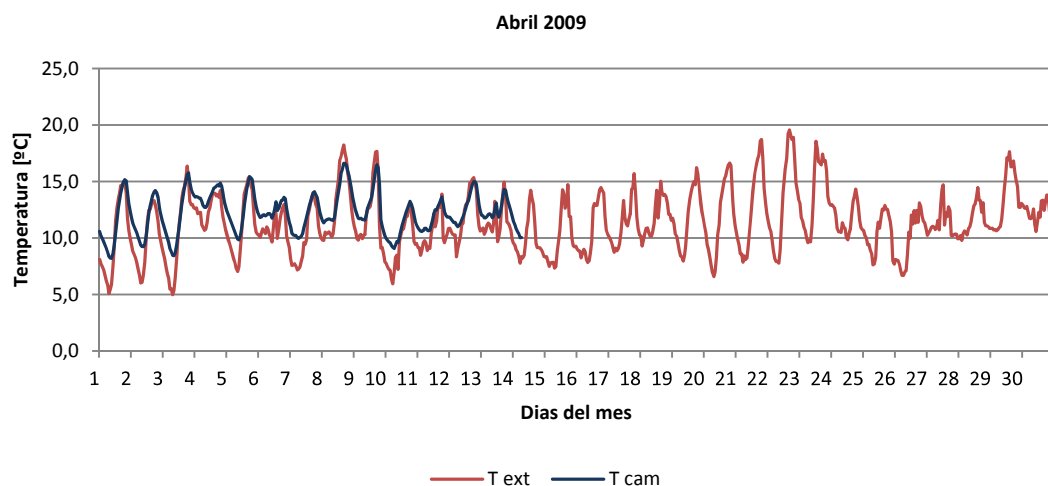


Figura IV.11: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de abril del 2009.

Se resume que, durante el tiempo analizado, las gráficas de la temperatura en la cámara son menos acusadas, tanto las máximas como las mínimas diarias, que las que muestran las gráficas de la temperatura exterior. La cámara tiende a amortiguar los “picos” de la temperatura exterior.

Se puede concluir que la cámara amortigua los valores de temperatura del ambiente exterior, poseyendo menos extremos y, como consecuencia menor amplitud. Se ha advertido un comportamiento de valores mínimos de temperatura en la cámara siempre mayores que los mínimos de la temperatura exterior. Sin embargo, no se ha advertido un comportamiento claro en el caso de los valores máximos, siendo algunas veces del mismo valor, junio del 2008, u otras más bajo, por ejemplo diciembre del 2008. Cuando los comportamientos no son oscilatorios, muy probablemente por periodos de lluvia, los valores de temperatura de la cámara son superiores.

Diagramas de tendencia de temperatura en la sección del cerramiento

En esta parte, se procede a realizar un análisis del comportamiento diario de temperatura en cuatro días elegidos que fuesen representativos por cada estación: primavera, verano, otoño e invierno. Este análisis ha sido llevado a cabo mediante diagramas de tendencia. Los datos recogidos son analizados a través de la sección del cerramiento, indicando con colores, según las distintas horas. Los valores de los datos representados han sido recogidos también en una tabla.

A continuación se muestran los diagramas de tendencia de temperatura en las tres posiciones que indica la sección representada en la figura IV.12

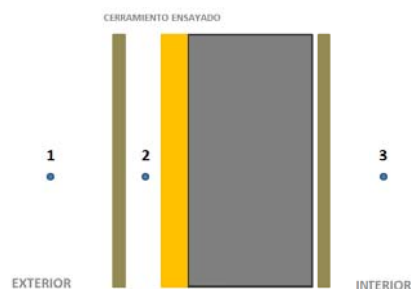


Figura IV.12: Posiciones del cerramiento de fachada ventilada de granito monitorizado. 1 ambiente exterior, 2 cámara de aire del cerramiento y 3 ambiente interior

En el caso del día elegido que representa la **primavera**, el 17 de mayo del 2008, se observa que en la temperatura interior del Salón de Grados ha habido variaciones horarias. Con respecto a la temperatura de la cámara, es donde se producen mayores variaciones térmicas. La tendencia de las temperaturas de la cámara es inferior a la del exterior y la del interior. La temperatura exterior más elevada registrada ha sido a las 12:00h. En la tabla IV.1 se muestra los valores de temperaturas registradas, tanto en el exterior como en la cámara y en el interior.

Hora	Exterior	Cámara	Interior
9:00:00	18,7	14,8	18,7
12:00:00	21,5	15,8	20,4
15:00:00	21,4	16,7	21,3
18:00:00	20,4	17,1	20,4
21:00:00	20,0	16,2	20,1

Tabla IV.1: Tendencia de temperaturas ambientales del exterior [°C], cámara e interior durante un día de primavera 17/05/2008 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

Lo descrito anteriormente puede observarse en la figura IV.13.

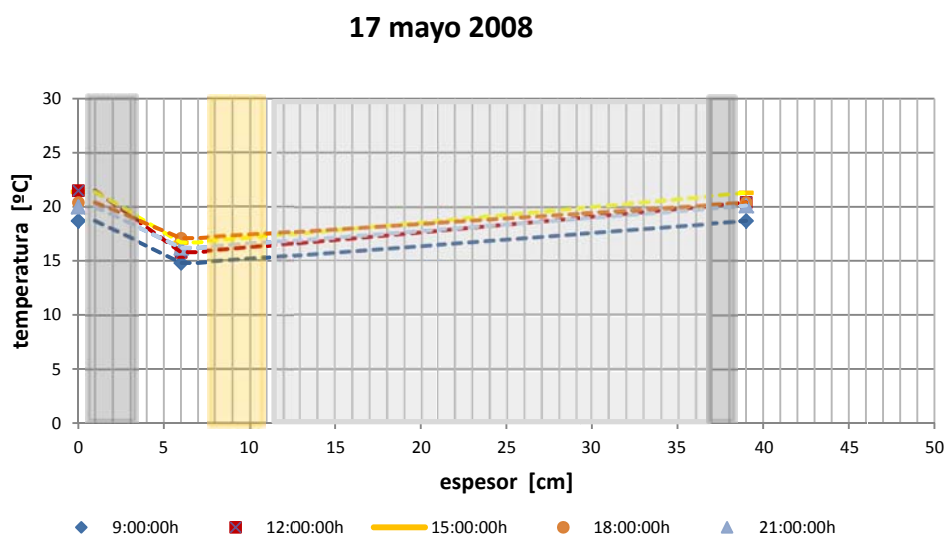


Figura IV.13: Datos de temperatura ambiental en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior en °C del día de primavera 17/05/2008

En el caso del 1 de agosto del 2008, en **verano**, la temperatura interior del Salón de Grados ha sido constante. Con respecto a las temperaturas de la cámara, las oscilaciones han variado, siendo superiores a las del exterior a las 9:00h y a las 12:00h.

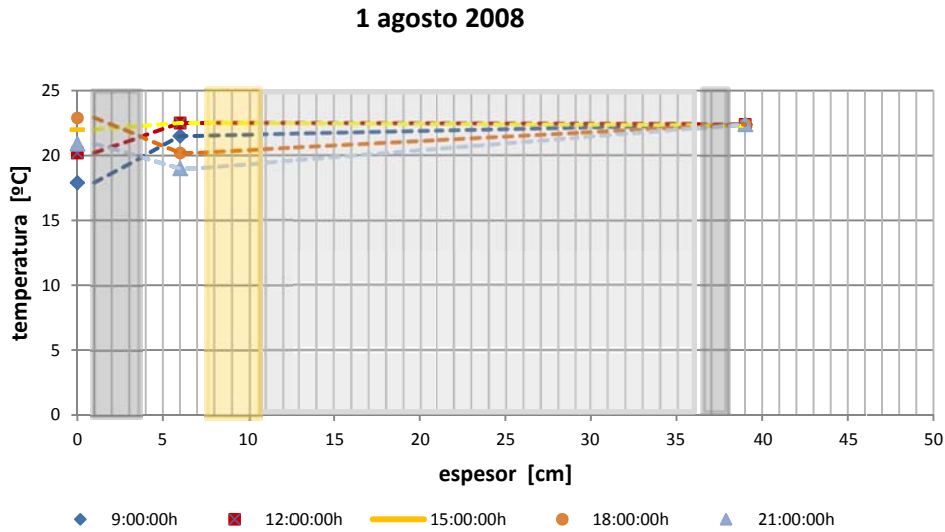


Figura IV.14: Datos de temperatura ambiental en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior en °C del día de verano 01/08/2008

Hora	Exterior	Cámara	Interior
9:00:00	17,9	21,5	22,4
12:00:00	20,2	22,5	22,4
15:00:00	22,0	22,5	22,3
18:00:00	22,9	20,2	22,4
21:00:00	20,9	19,0	22,4

Tabla IV.2: Tendencia de temperaturas ambientales del exterior [°C], cámara e interior durante un día de verano 01/08/2008 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

A partir de las 15:00h, las temperaturas de la cámara se han vuelto inferiores a las del exterior. La mayor oscilación térmica se ha producido en el exterior.

En el análisis de un día de **otoño**, el 1 de noviembre del 2008, el Salón de Grados también ha tenido una temperatura constante horaria que no ha variado. Las temperaturas de la cámara han sido siempre superiores a la del exterior. A las 15:00h se alcanzó la máxima temperatura, tanto en el exterior como en la cámara. Estas temperaturas representadas son también colocadas en la tabla. Durante este día y en el periodo de 16:00 horas a 18:00 horas, se registraron precipitaciones.

1 noviembre 2008

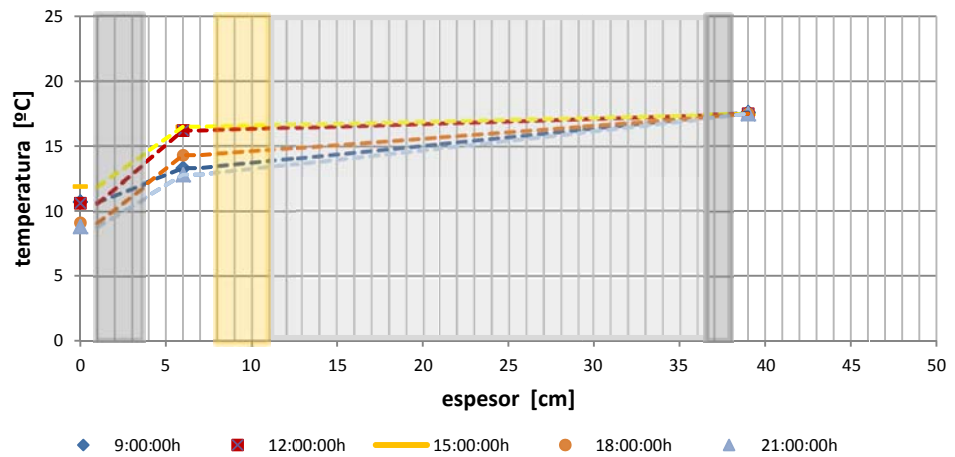


Figura IV.15: Datos de temperatura ambiental en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior en °C del día de otoño 01/11/2008

Hora	Exterior	Cámara	Interior
9:00:00	10,7	13,3	17,6
12:00:00	10,6	16,2	17,5
15:00:00	11,9	16,5	17,5
18:00:00	9,1	14,3	17,5
21:00:00	8,8	12,8	17,5

Tabla IV.3: Tendencia de temperaturas ambientales del exterior [°C], cámara e interior durante un día de otoño 01/11/2008 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

Se puede observar con detenimiento cómo son las variaciones térmicas horarias en las tres posiciones. En el caso del día de **invierno**, 1 de febrero 2009, es curioso observar cómo los datos de temperatura de la cámara han sido inferiores a los del exterior y del interior del Salón de Grados. Los valores máximos registrados han sido los del interior del Salón de Grados.

1 febrero 2009

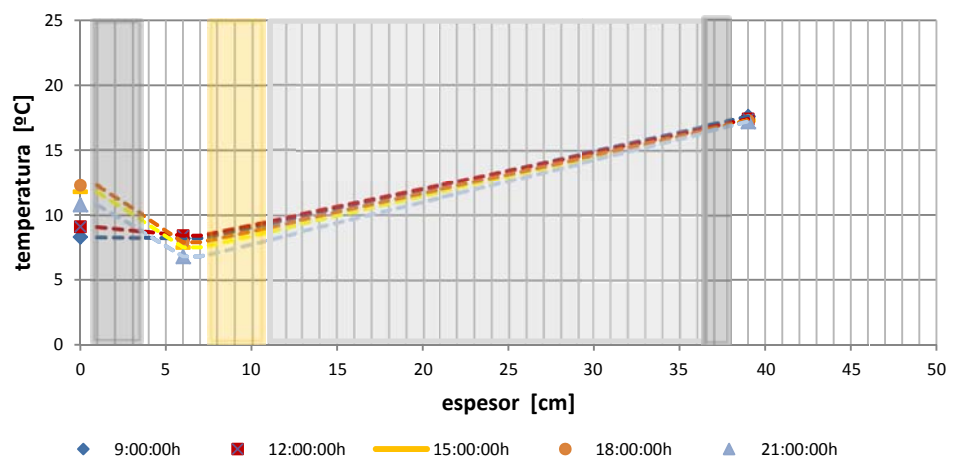


Figura IV.16: Datos de temperatura ambiental en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior en °C del día de invierno 01/02/2009

Los valores reflejados muestran que la temperatura máxima en el exterior se ha producido a las 18:00h. Sin embargo la temperatura máxima en la cámara ha sido a las 12.00h.

Hora	Exterior	Cámara	Interior
9:00:00	8,3	8,2	17,6
12:00:00	9,1	8,4	17,4
15:00:00	11,8	7,5	17,3
18:00:00	12,3	7,9	17,3
21:00:00	10,8	6,8	17,2

Tabla IV.4: Tendencia de temperaturas ambientales del exterior [°C], cámara e interior durante un día de invierno 01/02/2009 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

Se concluye que durante la primavera y el verano, las condiciones de temperatura de la cámara varían, siendo en algunos momentos inferiores a la temperatura exterior y en otros casos superiores. En el día de otoño ha sido claramente la temperatura de la cámara superior a la del exterior. En el caso del día del invierno, la temperatura de la cámara ha sido marcadamente inferior.

Monitorización de febrero a marzo del 2016.

Posteriormente y durante el mes de febrero y marzo del 2016, se realizó una monitorización de la densidad de tasa de flujo de calor en el cerramiento donde se recogieron valores de temperatura y humedad relativa exterior, interior y de la cámara de aire.

La figura IV.17 muestra la temperatura ambiental obtenida de la monitorización *in situ* de la fachada en comparación con los valores obtenidos en las estaciones meteorológicas de A Coruña y A Coruña aeropuerto. Hay mayor similitud en los valores de temperatura en el aeropuerto de A Coruña.

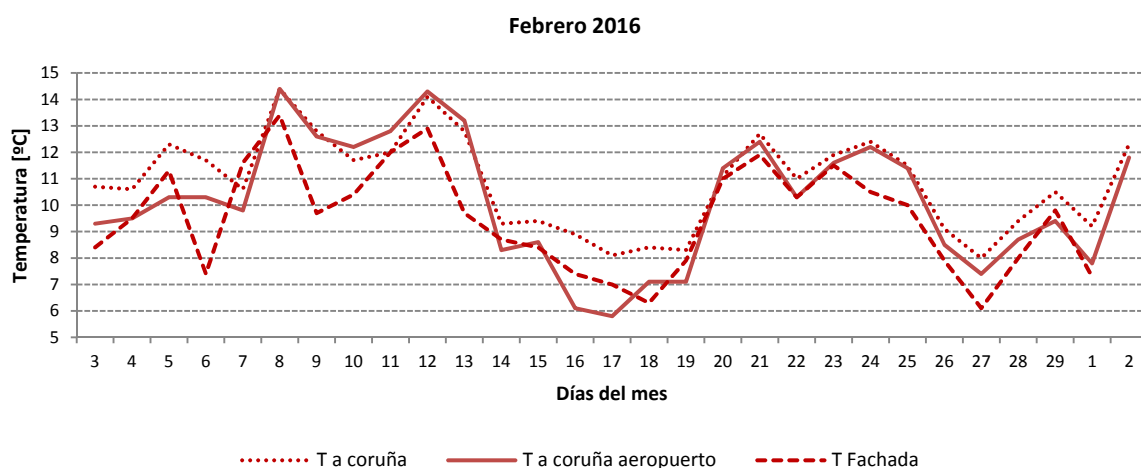


Figura IV.17: Temperatura ambiental en °C durante el mes de febrero del 2016 en la fachada, en la estación meteorológica de A Coruña y la estación de A Coruña aeropuerto

Analizando los datos recogidos *in situ* en el mes de febrero y marzo del 2016, puede observarse que representado en los valores de temperatura, teniendo unas oscilaciones diarias térmicas de lunes a viernes, cuando estuvo encendida la calefacción.

La figura IV.18 representa la temperatura interior (línea naranja) refleja con sus oscilaciones la calefacción diaria diurna que se ha dispuesto. Se puede deducir también que los fines de semana no ha existido aporte de calefacción.

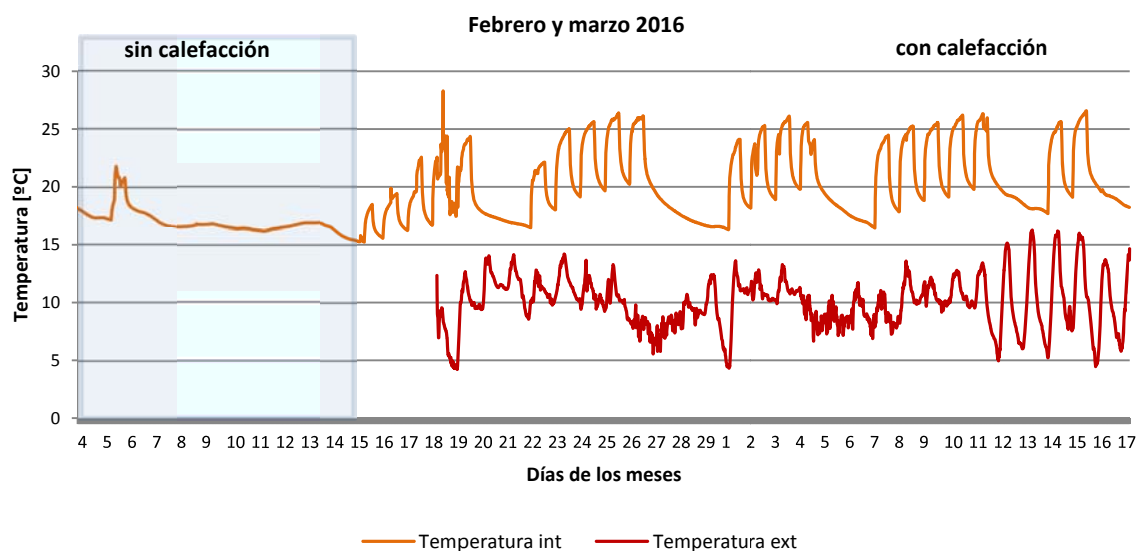


Figura IV.18: Temperatura interior y exterior desde el día 4 de febrero hasta el 17 de marzo del 2016

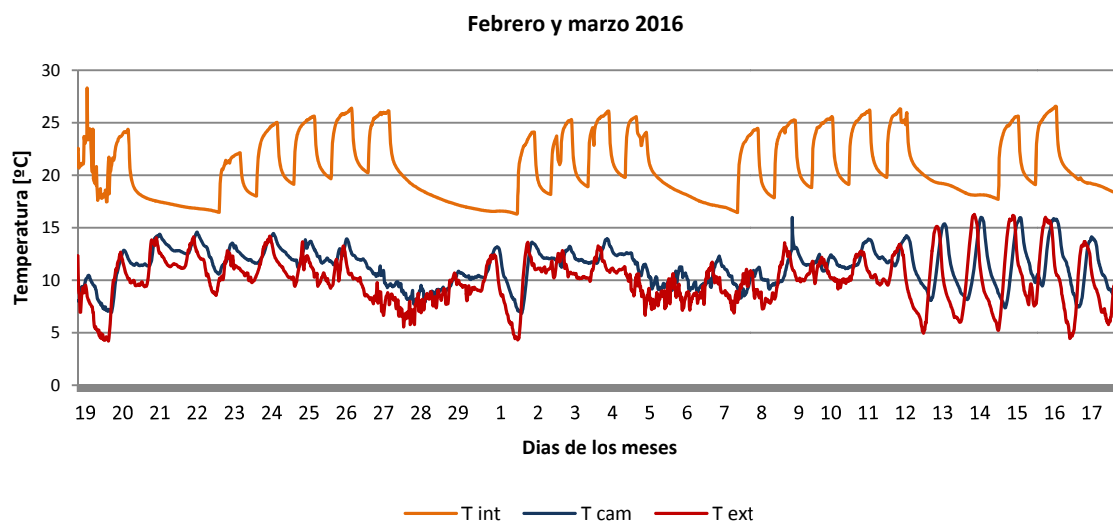


Figura IV.19: Temperatura interior, de la cámara y del exterior desde el día 19 de febrero hasta el 17 de marzo del 2016

De todo lo expuesto, **se puede concluir que** el año monitorizado refleja aproximadamente los valores normales de temperatura, siendo un comportamiento representativo. Los valores de temperatura indicados en la estación de AEMET del aeropuerto de A Coruña, son los más similares a los valores recogidos en el lugar de la fachada. Finalmente, y en relación a la

cámara ventilada, los valores de temperatura obtenidos reflejan una amortiguación del comportamiento del exterior, con menores oscilaciones y amplitudes térmicas.

IV.1.2 COMPORTAMIENTO HÍDRICO

Humedad relativa en la monitorización

Este apartado hace un análisis de los valores de humedad relativa. En el caso de la humedad relativa exterior, tal y como lo refleja esta figura IV.20, se representa los valores recogidos durante la monitorización de mayo del 2008 a abril del 2009.

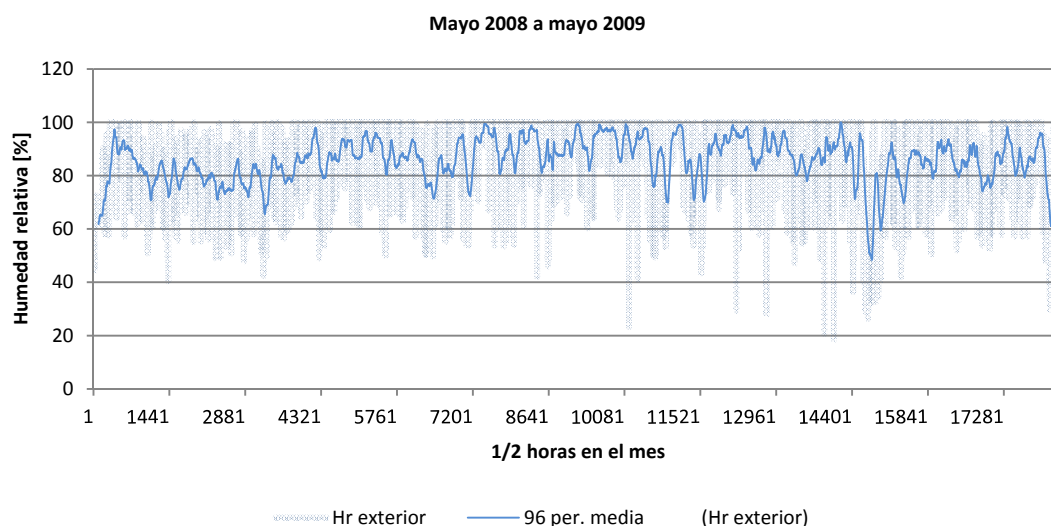


Figura IV.20: Humedad relativa en % en A Coruña (azul) de mayo del 2008 a mayo 2009

Se procede ahora, con los datos recogidos de humedad relativa exterior y de la cámara de aire de la monitorización in situ, a analizarlos con más detalle, trimestral y mensualmente, viendo la tendencia de comportamiento diario y detectando la tendencia oscilatoria según la época del año.

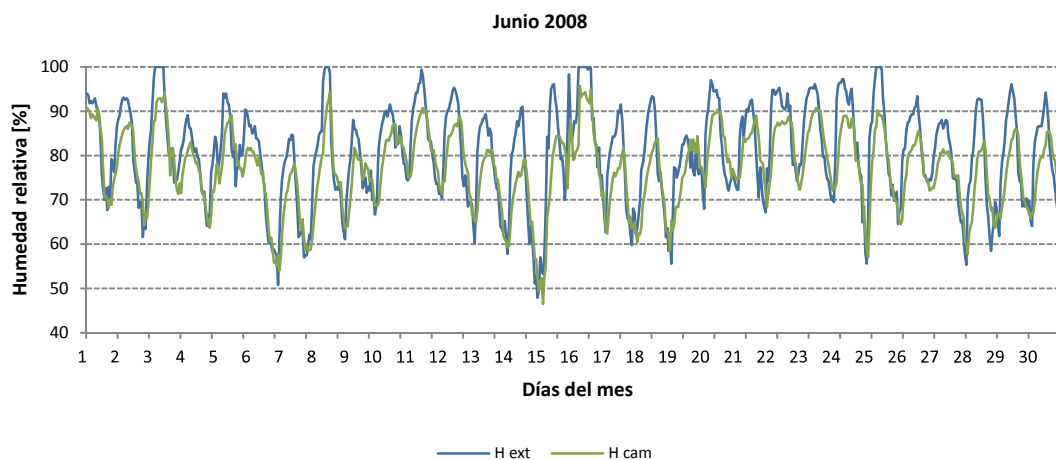


Figura IV.21: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de junio del 2008.

En el caso de los datos recogidos de las monitorizaciones del mes de junio del 2008, se observa en general que los datos de la humedad relativa del exterior tienen unas amplitudes en las oscilaciones mayores con respecto a los valores recogidos en la cámara. Sin embargo, esto no sucede lo mismo en los valores mínimos pues son muy similares. Existe una gran oscilación y amplitud diaria de la humedad relativa.

El trimestre de julio, agosto y septiembre del 2008, la tendencia de la media diaria de humedad relativa de la cámara ventilada es inferior a la media diaria obtenida por el ambiente exterior. Sólo en el mes de agosto se ha llegado al 100%. Los valores son muy similares.

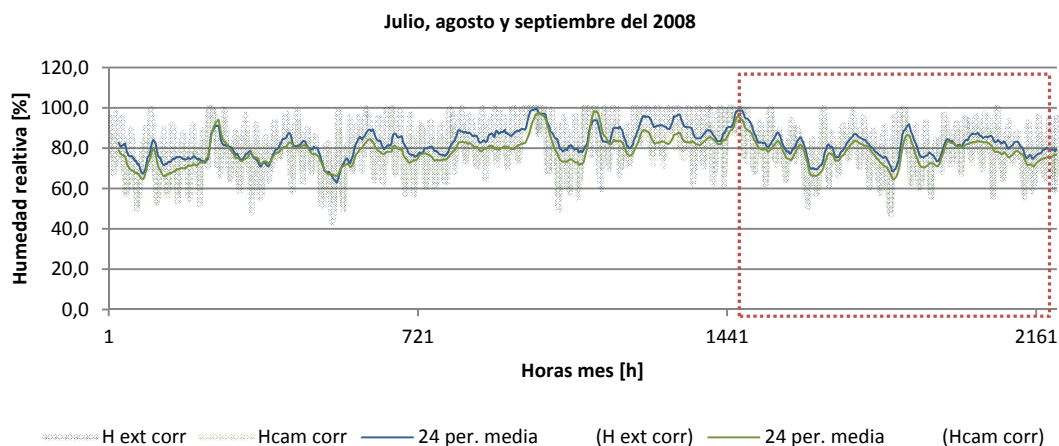


Figura IV.22: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de julio, agosto y septiembre del 2008.

Si se analiza con detalle el mes de diciembre del 2008, se observa el comportamiento de amortiguación que tiene la cámara con respecto al ambiente exterior. La cámara presenta oscilaciones de humedad relativa de menor amplitud que las del ambiente exterior.

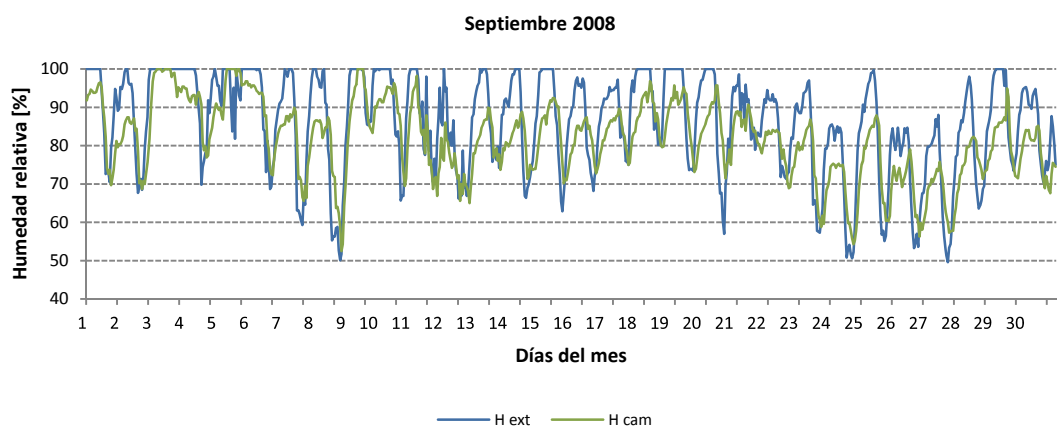


Figura IV.23: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de septiembre del 2008.

El trimestre de octubre, noviembre y diciembre del 2008 muestra una gráfica en la que a finales de octubre y el mes de noviembre la media diaria de la humedad relativa de la cámara es superior a la del ambiente exterior. Esto no sucede en el mes de diciembre.

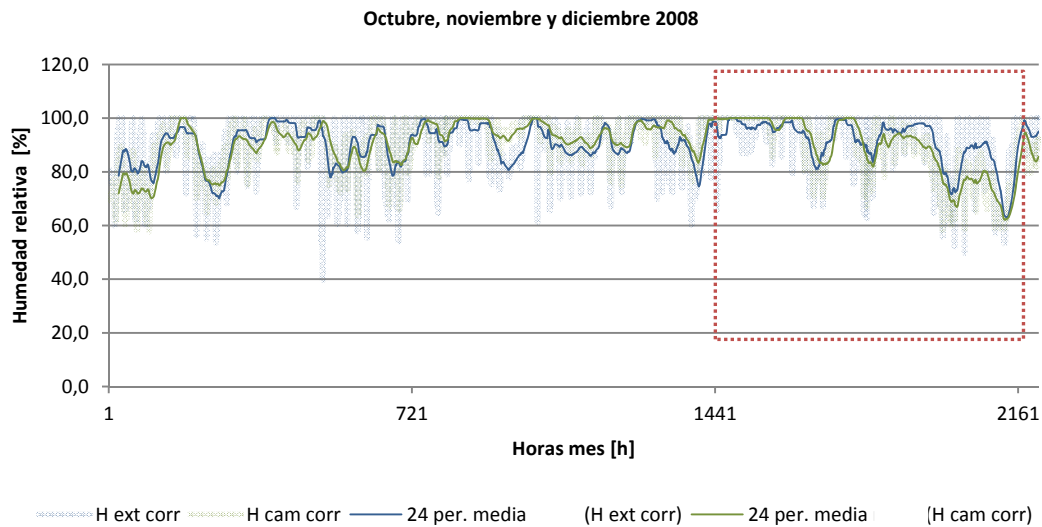


Figura IV.24: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de octubre, noviembre y diciembre del 2008.

En el caso del mes de diciembre del 2008, los valores recogidos en el comportamiento de la humedad relativa del ambiente exterior y de la cámara, se observa la tendencia de la humedad relativa de la cámara de amortiguar los valores máximos de la humedad relativa exterior. En cambio los valores mínimos son generalmente superiores en la cámara. Ha existido una gran cantidad de tiempo en que la humedad relativa ha alcanzado el 100%.

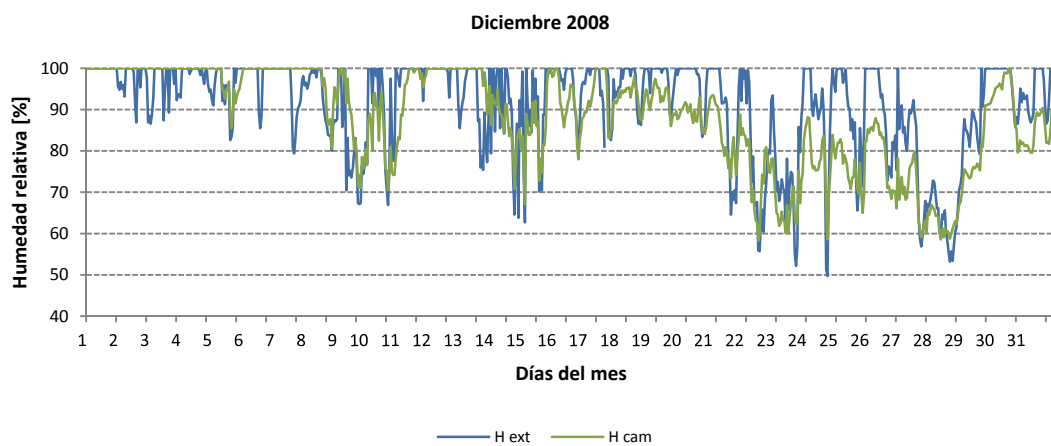


Figura IV.25: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de diciembre del 2008.

El trimestre enero, febrero y marzo del 2009 presenta una gráfica en la que se muestra la media diaria de la humedad relativa de la cámara y del exterior es mostrada nuevamente. Se aprecia que en ciertos momentos la humedad de la cámara es superior y en otro inferior, caso claro en la segunda mitad del mes de febrero.

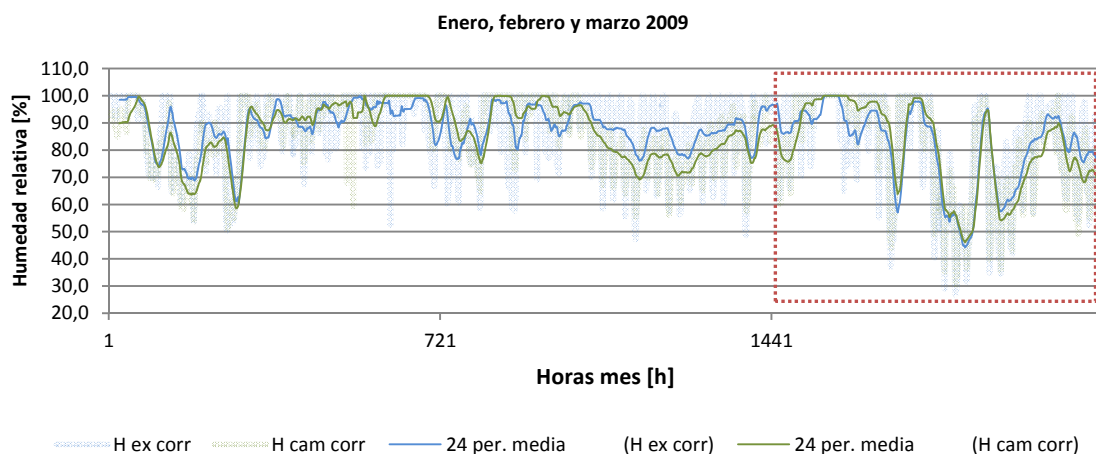


Figura IV.26: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de enero, febrero y marzo del 2009.

El mes de marzo del 2008, los valores de la humedad relativa entre el exterior y la cámara siguen siendo similares. Se da la misma situación que en el anterior mes analizado, los momentos de mayor humedad relativa se corresponden con las menores oscilaciones térmicas monitorizadas.

En particular, puede verse que los días del 8 al 12 de marzo del 2008 la humedad relativa de la cámara es mayor. Sigue la tendencia de la amortiguación de la humedad relativa por la cámara en los valores más altos, no así en los valores bajos que se muestra más elevada la humedad relativa de la cámara.

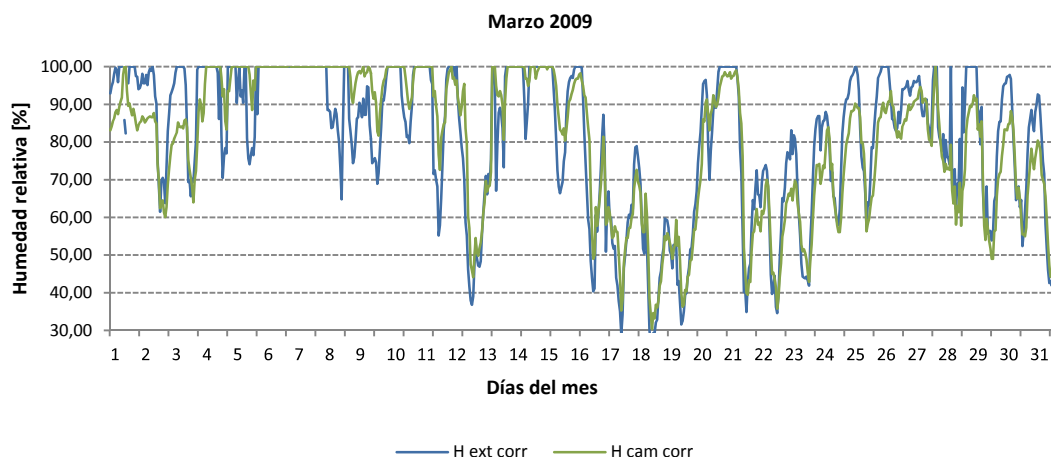


Figura IV.27: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de marzo del 2009.

Finalmente en mayo del 2009, la monitorización de la cámara se paró. Se representan exclusivamente los valores de humedad relativa exterior que han llegado frecuentemente al 100%.

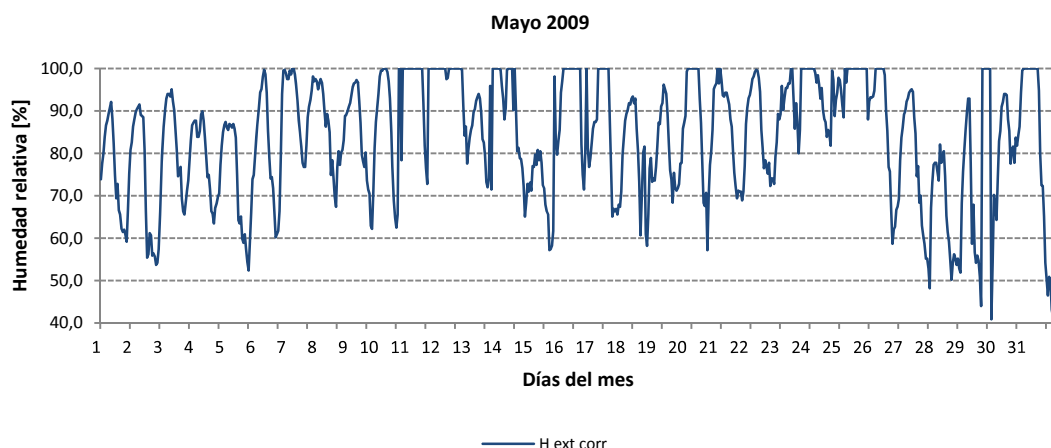


Figura IV.28: Humedad relativa del exterior (azul) en el mes de mayo del 2009.

De la observación de las figuras anteriores, se puede resumir que los valores de humedad relativa del ambiente exterior son bastante elevados. La tendencia diaria que posee la cámara es amortiguar los valores máximos de humedad relativa del ambiente exterior. Sin embargo, eso no sucede con los valores mínimos, siendo los de la cámara más elevados que los del ambiente exterior.

Contenido de vapor de agua en la cámara

Con los datos de humedad relativa y temperatura de la cámara de aire del cerramiento se ha procedido al cálculo del contenido del vapor de agua en el aire, denominada también humedad absoluta. Los resultados obtenidos son expresados gráficamente. La figura IV.29 recoge secuencialmente las cuatro estaciones anuales. Puede observarse que es en la estación del verano cuando la concentración de vapor de agua en la cámara es mayor. Esto tiene lógica, ya que el verano tiene las temperaturas mayores y como consecuencia, la capacidad potencial del ambiente para contener más vapor de agua. Si llueve o la humedad relativa se eleva, el contenido de vapor de agua será, por tanto, más elevado. Por contraposición, es en la estación del invierno cuando la concentración del vapor de agua es menor, ya que las temperaturas ambientales y como consecuencia de la cámara son menores.

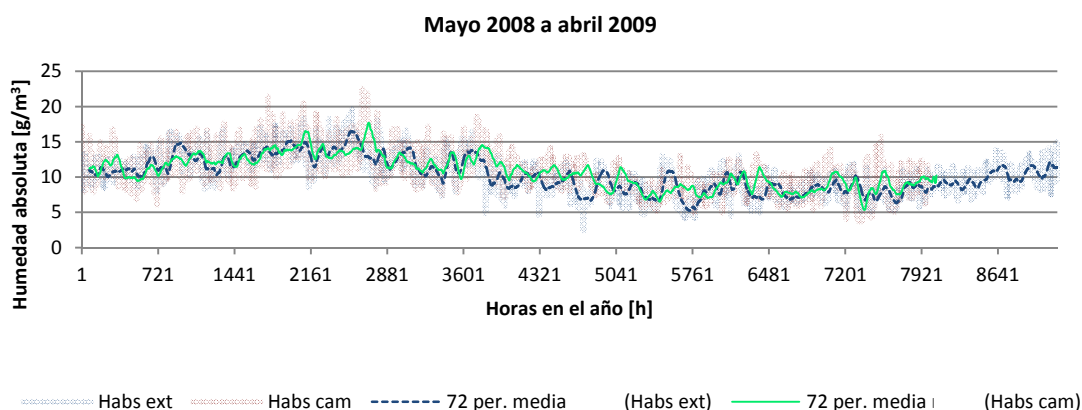


Figura IV.29: Concentración de vapor de agua en la cámara en g/m^3 en el ambiente exterior y la cámara durante el año de monitorización mayo 2008-abril 2009

El diagrama de barras mostrado indica la cantidad de humedad absoluta en g/m^3 de agua que ha existido en el ambiente exterior (azul) y en la cámara (verde). Se han realizado los cálculos de todos los meses del año. En el caso de mayo y abril, no todo el mes fue monitorizado por lo que el promedio no se hizo de todos los días. De los resultados extraídos, se puede observar que el peor mes en el que la cámara posee una mayor cantidad de agua es octubre del 2008. Por el contrario el mejor mes es junio en el que existe menos cantidad de agua en la cámara que en el ambiente exterior.

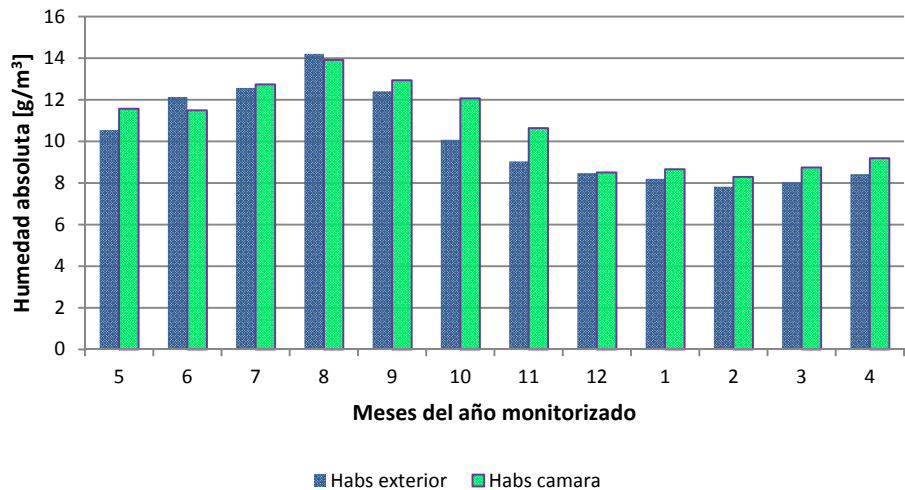


Figura IV.30: Promedio de humedad absoluta en el ambiente exterior (azul) y la cámara ventilada (verde) en los meses del año monitorizados mayo 2008 a abril 2009

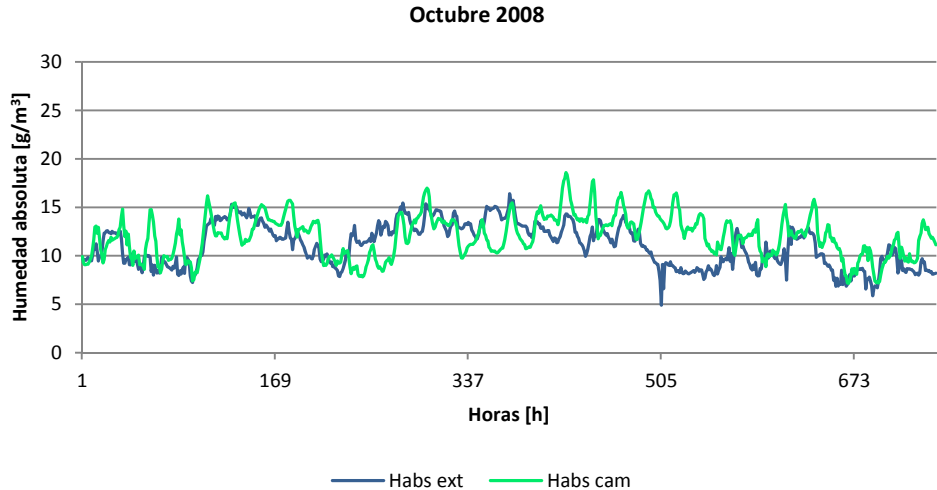


Figura IV.31: Humedad absoluta del ambiente exterior (azul) y de la cámara ventilada (verde) en octubre del 2008

Se ha representado el peor mes para la cámara ventilada desde el punto de vista hídrico. Se ven oscilaciones diarias de humedad absoluta en la cámara (verde). No es el caso así del comportamiento de la humedad absoluta ambiental (azul), donde este patrón no se advierte. Entre la tercera y cuarta semana, se produce una gran diferencia entre humedades absolutas.

Existe una gran caída en el ambiente y sin embargo, en la cámara la tendencia es de bajada pero más mantenida.

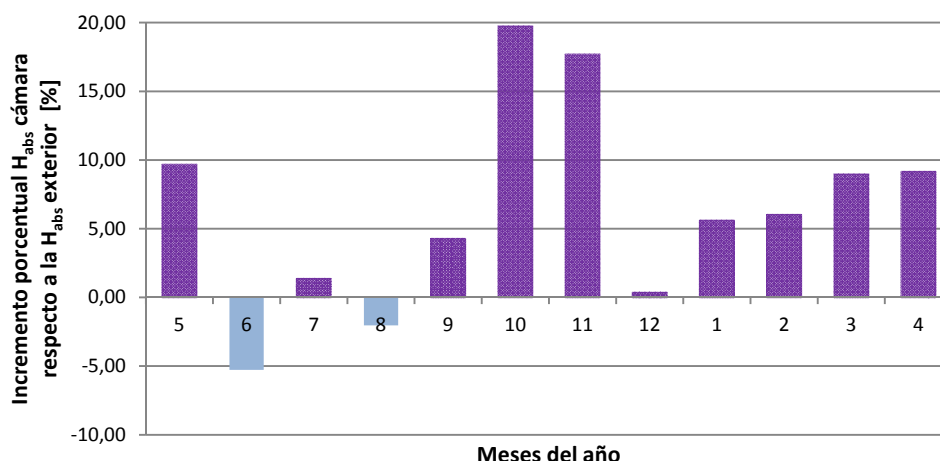


Figura IV.32: Incremento porcentual de la Habs de la cámara con respecto a la H_{abs} del ambiente exterior en todos los meses del año monitorizados, de mayo 2008 a abril 2009. En violeta incrementos positivos y en azul incrementos negativos.

Si se representa los incrementos porcentuales de los valores promedios mensuales anteriores se obtiene este diagrama de barras. En relación a la humedad absoluta en la cámara se puede resumir que, de los resultados de los doce meses de humedad absoluta, en diez de ellos la humedad absoluta (H_{abs}) de la cámara tiene un valor promedio superior a la del ambiente exterior, aunque de relevancia variable.

Diagramas de tendencia de humedad relativa en la sección del cerramiento

En la figura representada a continuación se muestra la tendencia de humedades relativas del día de **primavera** 17 de mayo del 2008, entre las 9 horas de la mañana y las 21 horas de la tarde. Se observa que en este día la humedad relativa del interior del local ha variado. Se observa claramente como la humedad relativa más alta de todos los ambientes es la de la cámara ventilada del cerramiento. Las condiciones de humedad relativa ambiental en el exterior también han variado a lo largo del día.

17 mayo 2008

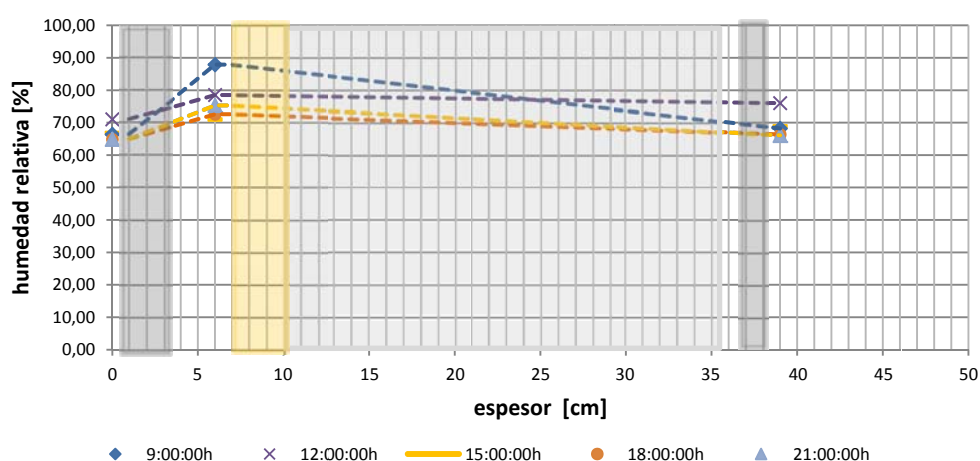


Figura IV.33: Datos de humedad relativa ambiental en % en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior del día de primavera 17/05/2008

Los datos representados en la figura IV.32 tienen los valores indicados en la tabla IV.5. Se observa numéricamente este hecho en la columna del medio. Las variaciones de humedad relativa exterior realizadas oscilaron entre 64,9% y 71,0%.

Hora	Exterior	Cámara	Interior
9:00:00	66,4	87,9	68,2
12:00:00	71	78,5	76,0
15:00:00	66,9	71,0	68,9
18:00:00	64,9	72,6	66,4
21:00:00	64,9	75,3	66,1

Tabla IV.5: Tendencia de humedades relativas ambientales del exterior [%], cámara e interior durante un día de primavera 17/05/2008 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

El día de **verano** del 1 de agosto del 2008, la humedad relativa interior del local no varía. Las humedades relativas del exterior y de la cámara de aire muy ventilada son bastantes parecidas. Sin embargo, en la cámara la amplitud de los valores registrados son inferiores a las del exterior.

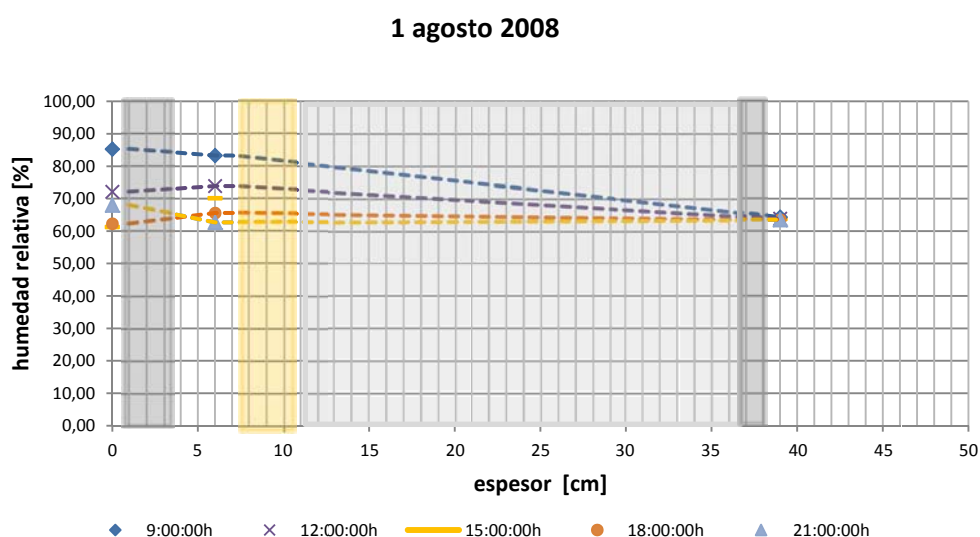


Figura IV.34: Datos de humedad relativa ambiental en % en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior del día de verano 01/08/2008

Esto se corrobora con los valores de la tabla adjunta. La amplitud de valores de humedad relativa en la cámara ha sido de 20%. En el caso del ambiente exterior, ha sido del 24%.

Hora	Exterior	Cámara	Interior
9:00:00	85,3	83,3	64,3
12:00:00	72,1	73,9	63,8
15:00:00	61,3	70,2	63,8
18:00:00	62,3	65,6	63,5
21:00:00	68	62,7	63,5

Tabla IV.6: Tendencia de humedades relativas ambientales del exterior [%], cámara e interior durante un día de verano 01/08/2008 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

Si se analiza las variaciones horarias de las humedades relativas del día de **otoño**, 1 de noviembre 2008, los valores interiores del Salón de Grados han sido constantes. En el caso de la cámara de aire, las variaciones de humedad relativa han sido pequeñas. En el caso de la humedad relativa del exterior, ésta es la que ha tenido más variación diaria. En la franja horaria desde las 9:00h hasta las 15:00h, la cámara de aire ha tenido mayor humedad relativa que el exterior. El proceso se ha invertido a partir de las 18:00h y hasta las 21:00.

1 noviembre 2008

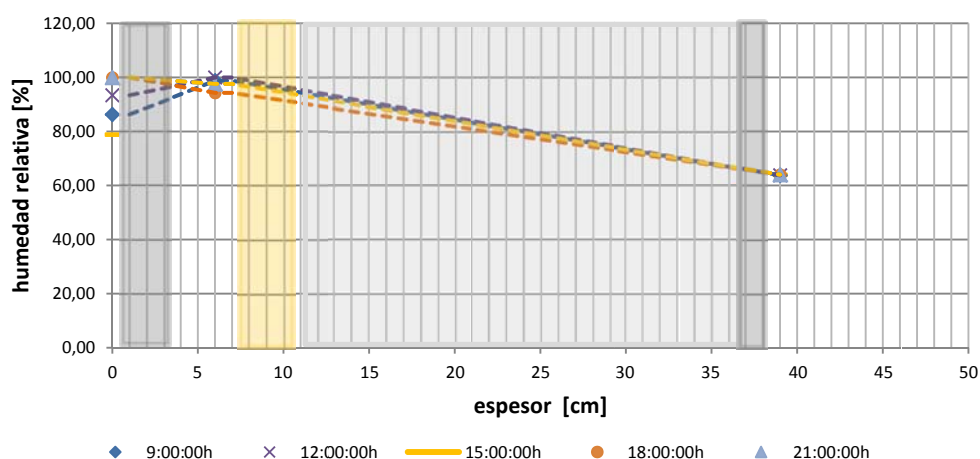


Figura IV.35: Datos de humedad relativa ambiental en % en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior del día de otoño 01/11/2008

Hora	Exterior	Cámara	Interior
9:00:00	86,3	98,8	63,8
12:00:00	93,4	100	63,8
15:00:00	78,9	98,5	64
18:00:00	100	94,3	64
21:00:00	100	97,6	64

Tabla IV.7: Tendencia de humedades relativas ambientales del exterior [%], cámara e interior durante un día de otoño 01/11/2008 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

En el caso de un día de **invierno**, del 1 de febrero del 2009, las variaciones en el interior del local han sido mínimas. Con respecto a las variaciones de humedad relativa en la cámara han sido también pequeñas. La mayor variación de humedad relativa se ha producido en el exterior. Sin embargo en la franja horaria desde las 12:00h hasta las 18:00h la humedad relativa de la cámara es superior a la del exterior. En las franjas restantes se invierte el proceso, es decir, la humedad relativa exterior es superior a la de la cámara. Los datos indicados en la tabla siguiente dan muestra de ello.

Hora	Exterior	Cámara	Interior
9:00:00	91,8	84,1	60,3
12:00:00	79,8	84,4	60,0
15:00:00	74,6	82,8	60,3
18:00:00	68,9	79,6	61,3
21:00:00	84,7	83,9	62,6

Tabla IV.8: Tendencia de humedades relativas ambientales del exterior [%], cámara e interior durante un día de otoño 01/02/2009 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

1 febrero 2009

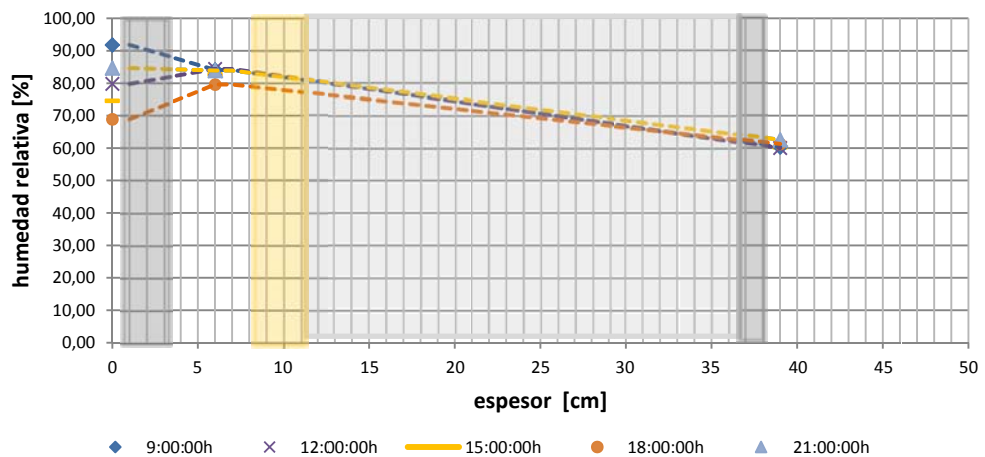


Figura IV.36: Datos de humedad relativa ambiental en % en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior del día de invierno 01/02/2009

Se concluye que en la primavera, otoño e invierno, la humedad relativa de la cámara, en general, ha sido superior a la del ambiente exterior. Es en el verano donde la tendencia entre la cámara y el exterior es muy parecida, variando mínimamente.

De todo lo expuesto, **y para finalizar el apartado hídrico Se puede concluir finalmente que:**

El año monitorizado refleja aproximadamente los valores normales de humedad relativa exterior, siendo un comportamiento representativo.

Existe gran contenido de humedad ambiental exterior. De hecho han existido 3845h en el año en las que la humedad ambiental exterior ha sido mayor del 79%. Los valores de humedad relativa de la cámara de aire obtenidos reflejan una amortiguación del comportamiento del exterior, menores oscilaciones hídricas, en la humedad relativa.

De los resultados analizados se ha detectado que la cámara posee en diez meses del año un valor de humedad absoluta más elevado que el ambiente exterior.

En cuanto al comportamiento diario, se concluye que en la primavera, otoño e invierno, la humedad relativa de la cámara, en general, ha sido superior a la del ambiente exterior. Es en el verano donde la tendencia entre la cámara y el exterior es muy parecida, variando mínimamente.

IV.2 SOLICITACIONES HÍDRICAS SOPORTADAS

En este segundo apartado del capítulo IV de monitorización *in situ*, se van a exponer los resultados relativos a las solicitudes hídricas que la fachada ventilada de granito ha estado expuesta durante los periodos monitorizados. El objetivo de esta parte es conocer y cuantificar, la exposición hídrica-ambiental de la fachada ventilada real elegida. En particular se da respuesta a las preguntas abajo indicadas:

. ¿Cuál ha sido la presión de vapor en el ambiente durante el año monitorizado y en los meses de febrero y marzo del 2016?, ¿es similar a la presión de vapor de saturación?, ¿Cuándo se produce los valores más altos?

. ¿Cómo es el comportamiento en el cerramiento del movimiento de presión de vapor?, ¿Cuál es la frecuencia y balance del movimiento de presión de vapor entre la cámara y el exterior?, ¿Y entre la cámara y el interior?

. ¿Cómo es el movimiento de humedad en el cerramiento e interior cuando llueve?

Para exponer los argumentos que dan respuesta a las preguntas anteriores, el apartado se organiza en tres partes. Primeramente se examina la presión de vapor de agua tanto ambiental como en la cámara y en el interior del local. En una segunda parte se procede a realizar un análisis del movimiento de vapor de agua a través del cerramiento. Finalmente se procede a realizar un estudio de los resultados obtenidos de las precipitaciones caídas y otros parámetros hídricos. El apartado remata con un pequeño resumen de lo hallado considerado relevante.

IV.2.1 PRESIÓN DE VAPOR DE AGUA

Con los datos de temperatura y humedad relativa recogidos durante ese año del exterior, de la cámara y del interior, y con la ayuda de los ábacos, se reconstruyeron las presiones de vapor horarias durante todo el año en estas tres localizaciones. Estos tres datos son representados a continuación en la siguiente figura.

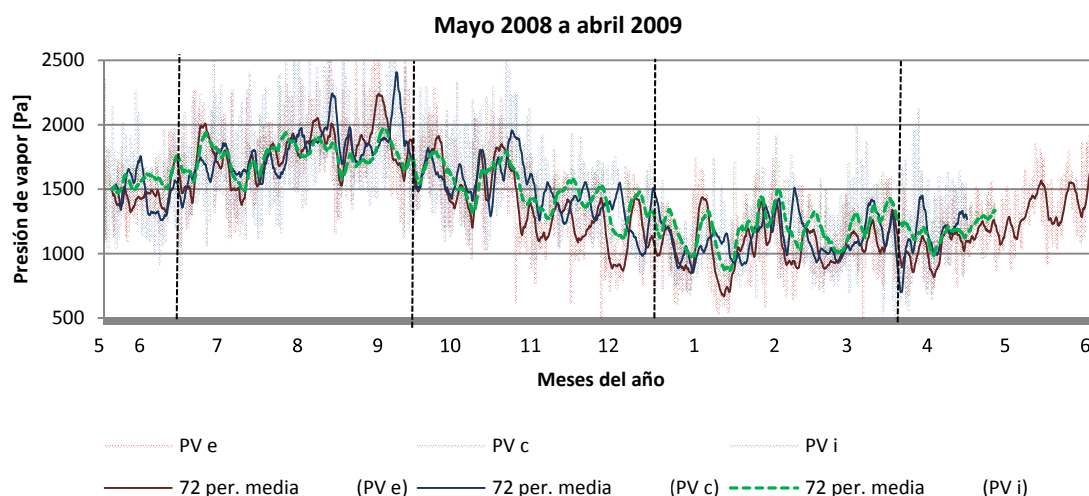


Figura IV.37: Presión de vapor de agua horaria (Pa) en el exterior Pve (rojo), presión de vapor en la cámara de aire Pvc (azul) y presión de vapor en el interior Pvi (verde) durante el año de monitorización.

Se observa que la presión de vapor durante el verano, es la de mayor valor con respecto a las otras estaciones. Es la época en la que se obtienen los valores más altos de presión (Pa) en todas las localizaciones. Por el contrario, los valores del invierno son los de menor presión de vapor. Se deduce gráficamente que la presión de vapor en el interior, y en otoño e invierno, algunas veces incluso se vuelve la mayor presión de vapor.

Representadas las presiones de vapor anuales de la cámara y del exterior con las medias de 72h, se observa que los meses de otoño e invierno, la presión de vapor de la cámara tiene una tendencia a volverse superior a la del exterior. En el caso del verano, las presiones de vapor son más similares.

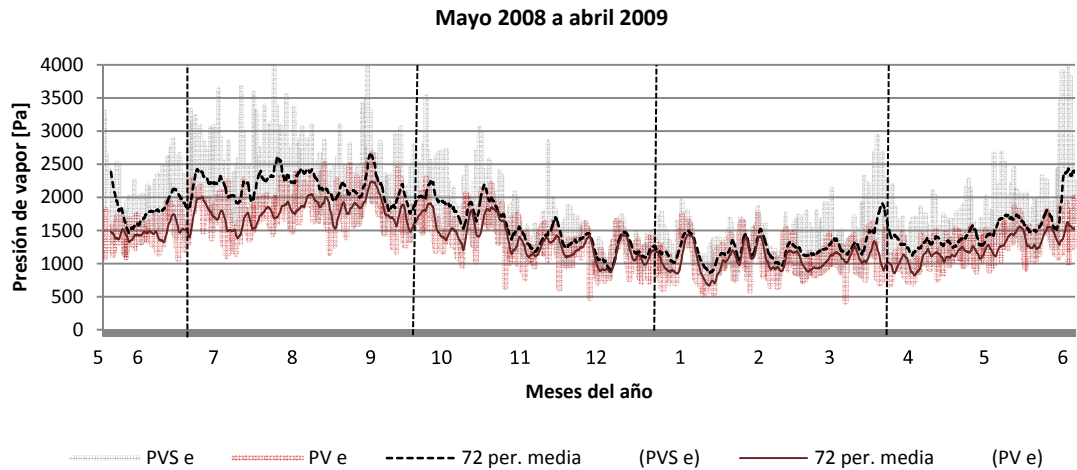


Figura IV.38: Presión de vapor en el exterior $P_v e$ (rojo) y presión de vapor de saturación en el exterior $P_{vs} e$ (gris discontinuo) durante el año de monitorización.

Si ahora se considera la media de 72h de la presión de vapor exterior con respecto a la presión de vapor de saturación, se puede observar que son en los meses de finales de octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero los que el ambiente posee mayor presión de vapor, cercana a la saturación.

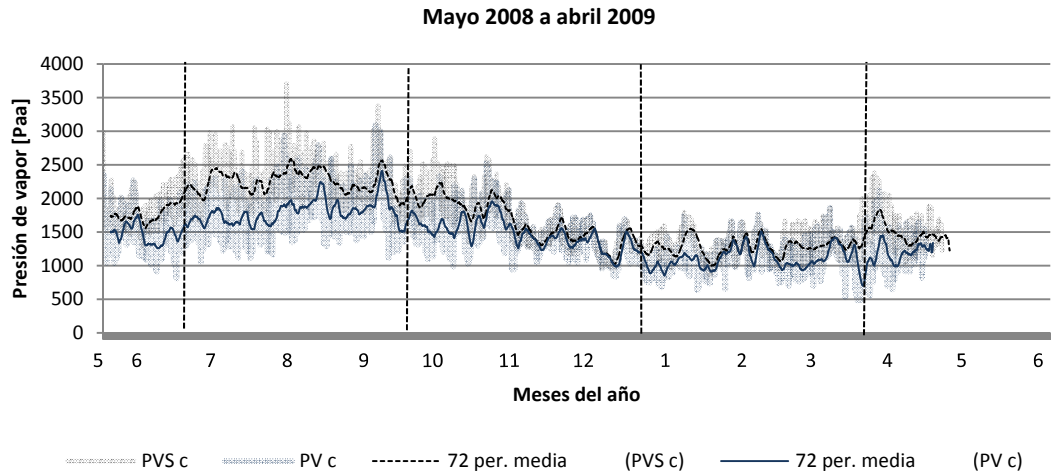


Figura IV.39: Presión de vapor en la cámara $P_v c$ (violeta) y presión de vapor de saturación en el exterior $P_{vs} c$ (negro discontinuo) durante el año de monitorización.

Por el contrario, son los meses de verano los que tiene una presión de vapor en el ambiente más diferente de la de saturación.

En el caso de la presión de vapor en la cámara de aire ventilada se observa que la media de 72h es similar a la de presión de vapor de saturación en los meses del otoño e invierno. En el caso del verano se observa la mayor diferencia entre la presión de vapor que tiene la cámara de aire y la máxima capacidad para contener vapor de agua. Tendencia muy similar a la del ambiente exterior.

Se resume que es en otoño e invierno cuando más riesgo existe de la condensación de agua en la cámara y también en el exterior. De hecho, entre noviembre y diciembre y entre enero y febrero la presión de vapor de saturación es casi similar a la presión de vapor. Se correlaciona también las mayores diferencias entre la presión de vapor y la de saturación en el verano, cuando además la presión de vapor exterior, de la cámara e interior es muy parecida.

En la figura IV.40 puede observarse claramente que hay una gran diferencia entre la presión de vapor y la presión de vapor de saturación. No ha existido en todo el año riesgo de condensación alguno.

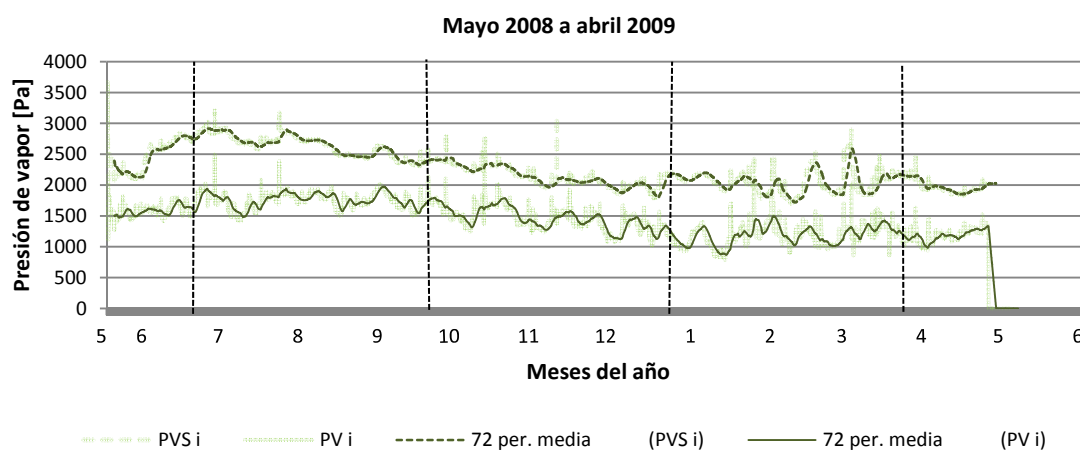


Figura IV.40: Presión de vapor en el interior Pvi (verde) y presión de vapor de saturación en el exterior Pvs i (verde discontinuo arriba) durante el año de monitorización.

Tendencia de presión de vapor diaria en un mes de otoño y un mes de verano

Las presiones de vapor son ahora analizadas con más detalle en el exterior, en la cámara y en el interior. Para ello se han elegido dos meses diferentes del año, uno el mes de junio y otro el mes de octubre del 2008.

En el caso del mes de junio del 2008, se puede ver en la figura IV.40 que la tendencia es que la presión de vapor en el interior del local sea la de mayor valor, y la difusión, por tanto, el movimiento del vapor es hacia el exterior y/o la cámara. Pueden verse las flechas rojas donde este movimiento se produciría.

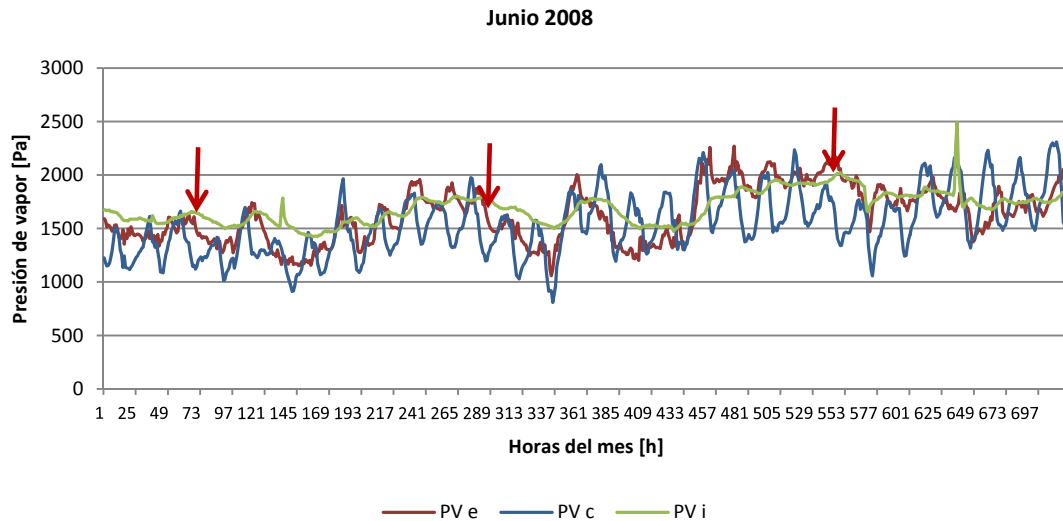


Figura IV.41: Presión de vapor en el exterior, en la cámara y en el interior en el mes de junio del 2008 monitorizado

En el mes de octubre del 2008 se observa que ahora es la cámara de aire en muchas horas del mes la que posee la presión de vapor más alta. La difusión de vapor de agua se realizará hacia el interior y/o el exterior. Puede verse esta situación en los momentos indicados con la flecha roja.

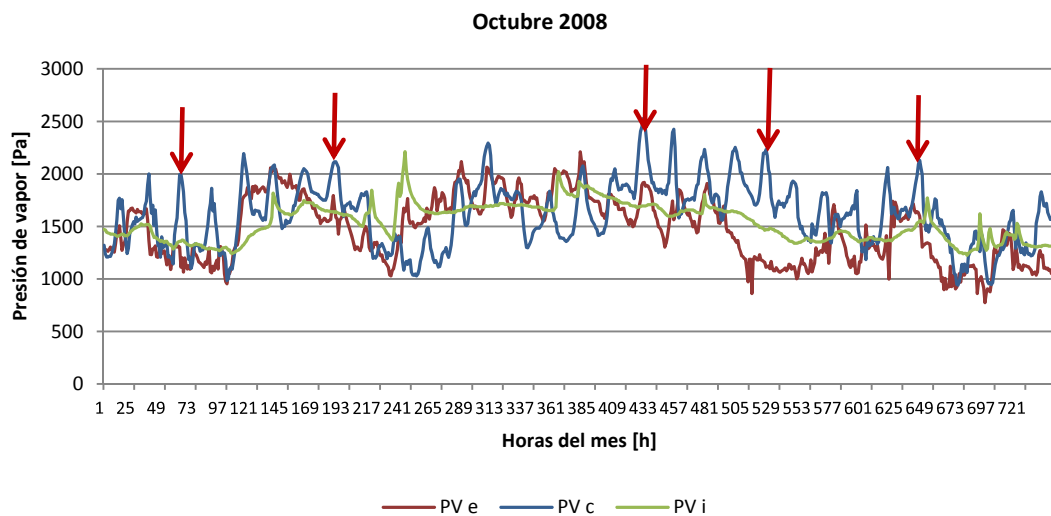


Figura IV.42: Presión de vapor en el exterior, en la cámara y en el interior en el mes de octubre del 2008 monitorizado

IV.2.2 MOVIMIENTO DE DIFUSIÓN DE VAPOR DE AGUA A TRAVÉS DEL CERRAMIENTO

Movimiento de humedad por difusión de vapor de agua en el cerramiento de la fachada ventilada en la monitorización 2008-2009

Una vez expuesto el comportamiento anual obtenido de la presión de vapor de agua en los ambientes exterior, de la cámara e interior, la siguiente pregunta más importante es saber

cómo se comporta en el cerramiento ante la difusión de vapor de agua. El primer indicador de la evaluación del mojado y secado en el cerramiento es el contenido de humedad. Después del contenido de humedad en el cerramiento, es el movimiento de humedad por difusión de vapor de agua el segundo indicador para la evaluación del secado y mojado en las fachadas ventiladas por ventilación de la cavidad. Esta acción de difusión de vapor puede promover el secado del cerramiento. Se ha de conocer por ello cuál es el sentido del flujo de vapor de agua.

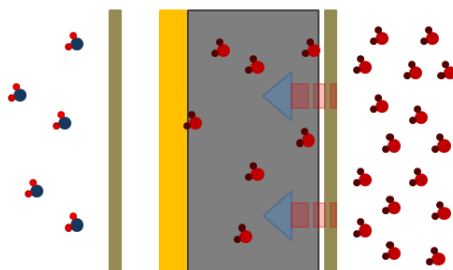


Figura IV.43: Movimiento del vapor de agua de mayor concentración hacia la menor concentración. Adaptado de DuPont Tyvek (2006)

La tendencia física del movimiento por difusión de vapor de agua es dirigirse de la zona de mayor presión de vapor hacia la de menor presión de vapor (ver figura IV.43). Debido a las condiciones climáticas reales de A Coruña y al tipo de cerramiento de fachada ventilada no se conoce finalmente cómo se ha movido el vapor de agua.

Pueden existir meses en el año en los cuales la difusión del vapor de agua ocurra en las dos direcciones, porque las condiciones climáticas varían según el día y la noche y/o según un día a otro. El sentido primario de *difusión de vapor* de agua es importante conocerlo también desde el punto de vista constructivo pues es considerado para colocar la barrera para-vapor en un sistema de cerramiento.

Por lo tanto con los datos recogidos, tanto en el año de monitorización 2008 y 2009 así como en los meses de febrero y marzo del 2016, se procede a este análisis mensual. Los datos representados aquí han sido obtenidos de forma indirecta. Se han monitorizado valores de temperatura y humedad relativa y es a partir de la tabla de presiones de vapor de saturación de la norma alemana DIN 4198-3 que se han obtenido las presiones de vapor de agua.

Utilizando los valores normales de las presiones de vapor de agua (P_v) mensual indicadas en la norma para la comprobación de las condensaciones intersticiales entre el interior del edificio y el exterior del mismo, se ve que las diferencias de presión de vapor oscilan entre aproximadamente +450 Pa en enero y febrero, valores de variaciones no existentes durante parte de los meses de octubre y junio y diferencia de valores de aproximadamente -300Pa para el mes de agosto.

Seguidamente se representa en la figura IV.45 y tabla IV.9 el valor de la diferencia de presión de vapor de agua, que indicaría su potencial para mojarse o secarse en la cámara y en el cerramiento y el sentido del mismo en cada mes monitorizado y con las dos condiciones de contorno. La primera entre el exterior y la cámara ($P_{ve}-P_{vc}$) y la segunda entre la cámara y el interior ($P_{vc}-P_{vi}$).

Mes de junio

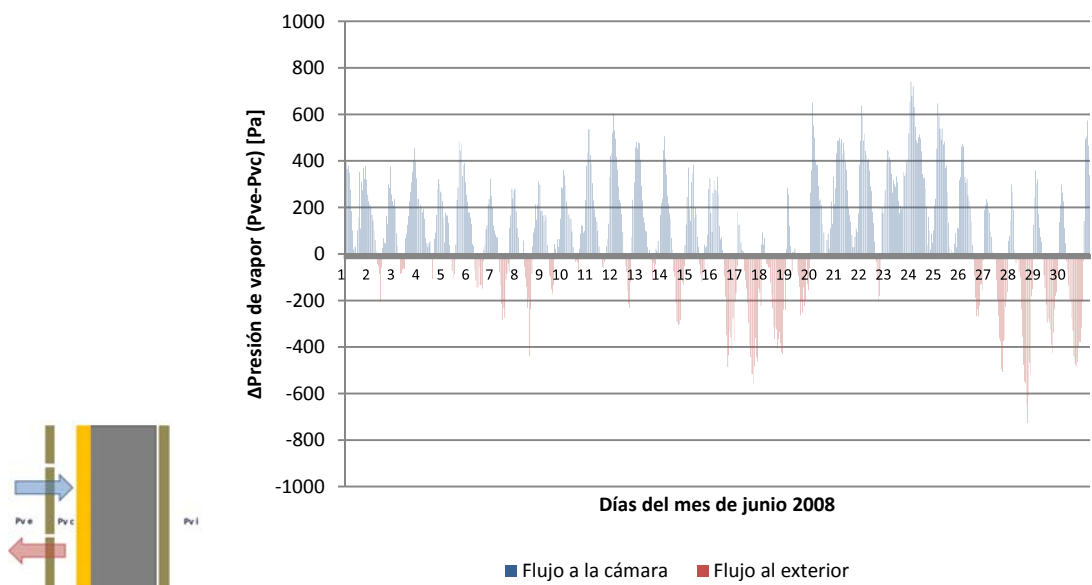


Figura IV.44. Sentido del flujo de vapor de agua saliente al exterior (rojo) y entrante a la cámara (azul) y diferencia presión de vapor en el mes de junio de 2008

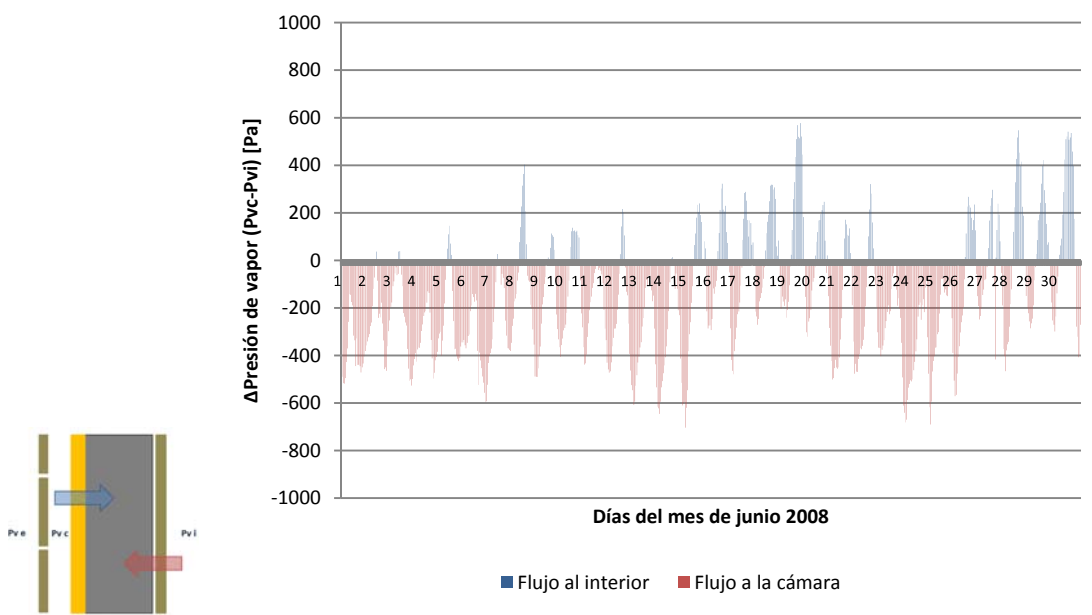


Figura IV.45: Sentido del flujo de vapor de agua saliente a la cámara (rojo) y entrante al ambiente interior (azul) y diferencia presión de vapor en el mes de junio de 2008

JUNIO 2008	Pve - Pvc Valor promedio [Pa]		Pvc - Pvi Valor promedio [Pa]	
	89		-154	
	A la cámara Horas [h]	Al exterior Horas [h]	Al interior Horas [h]	A la cámara Horas [h]
	475	244	187	532

	Pve - Pvc Valor promedio [Pa]		Pvc - Pvi Valor promedio [Pa]	
JULIO 2008	-27		-13	
	A la cámara Horas [h]	Al exterior Horas [h]	Al interior Horas [h]	A la cámara Horas [h]
	358	386	359	385
AGOSTO 2008	37		95	
	A la cámara Horas [h]	Al exterior Horas [h]	Al interior Horas [h]	A la cámara Horas [h]
	408	336	459	285
SEPTIEMBRE 2008	-77		55	
	A la cámara Horas [h]	Al exterior Horas [h]	Al interior Horas [h]	A la cámara Horas [h]
	335	385	374	346
OCTUBRE 2008	-139		75	
	A la cámara Horas [h]	Al exterior Horas [h]	Al interior Horas [h]	A la cámara Horas [h]
	248	496	468	276
NOVIEMBRE 2008	-205		9	
	A la cámara Horas [h]	Al exterior Horas [h]	Al interior Horas [h]	A la cámara Horas [h]
	209	511	353	367
DICIEMBRE 2008	-5		-116	
	A la cámara Horas [h]	Al exterior Horas [h]	Al interior Horas [h]	A la cámara Horas [h]
	370	374	233	511
ENERO 2009	-65		-63	
	A la cámara Horas [h]	Al exterior Horas [h]	Al interior Horas [h]	A la cámara Horas [h]
	323	421	291	453
FEBRERO 2009	-66		-67	
	A la cámara Horas [h]	Al exterior Horas [h]	Al interior Horas [h]	A la cámara Horas [h]
	325	347	237	435
MARZO 2009	-99		-71	
	A la cámara Horas [h]	Al exterior Horas [h]	Al interior Horas [h]	A la cámara Horas [h]
	272	472	298	446

Tabla IV.9: Valores promedio de junio del 2008 a marzo 2009 de la diferencia de presión de vapor de agua [Pa] y número de horas del sentido del flujo de vapor de agua

Los colores expresados en la tabla se correlacionan con las flechas de los diagramas del cerramiento. En rojo el movimiento del flujo de vapor indica que es de sentido saliente y en azul de sentido entrante. En los meses analizados, además de los valores de **diferencias de presión de vapor entre el exterior y la cámara** a lo largo del tiempo, también se dispusieron en las tablas los valores promedio mensuales y el número de horas de cada sentido del movimiento de difusión de vapor de agua. En esta monitorización los valores oscilaron entre 95 Pa y -200Pa.

Si se resume la proporción de horas según el sentido de movimiento y en cada uno de los 10 meses analizados (ver figura IV.45), se puede deducir cuanto ha repercutido en la totalidad del movimiento del flujo de vapor de agua. Se ha coloreado en azul las horas en las que el movimiento del vapor de agua se dirige a la cámara. En rojo se han representado las horas en las que el movimiento del vapor de agua se dirige al exterior. Claramente el mes de junio 2008 es el que más movimiento para el mojado ha tenido la cámara. Por la contra, es noviembre del 2008 el mes con el movimiento de flujo de vapor predominantemente de secado en la cámara.

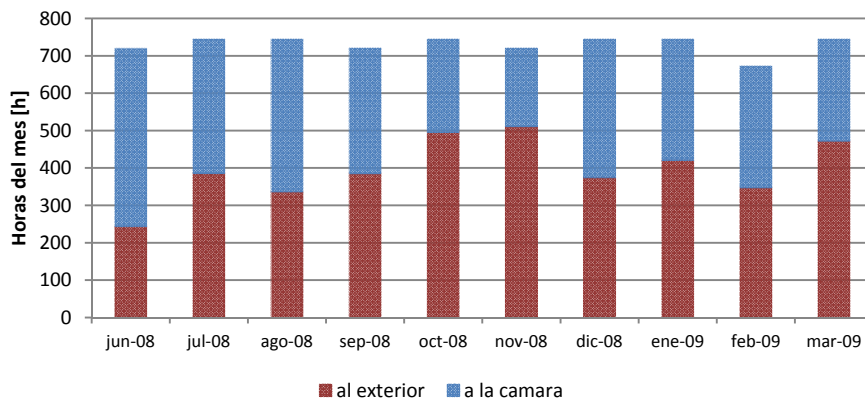


Figura IV.46: Porcentaje de horas en cada mes analizado de la diferencia de presión de vapor de agua $P_{ve} - P_{vc}$. En rojo movimiento de la cámara al exterior, en azul movimiento del exterior hacia la cámara

En este caso de la diferencia de **presiones de vapor entre la cámara y el interior** y recogiendo todos los datos obtenidos en cada uno de los 10 meses analizados, se puede deducir como ha sido el movimiento del flujo de vapor de agua. En azul las horas en las que el movimiento del vapor de agua se dirige al interior. En rojo las horas en las que el movimiento del vapor de agua se dirige al exterior. El mes con más movimiento de flujo de vapor hacia la cámara, y por lo tanto potencial de secado es junio, contrariamente a lo que sucede en la posición de la cámara. El mes con más potencial de mojado hacia el interior, octubre 2008 es en la cámara el mayor potencial de secado.

Estos resultados parecen deducir que la cámara se está comportando como un amortiguador hídrico. Este argumento puede ser soportado si se analizan dos meses representados en los diagramas de barras anteriores, junio y octubre, un mes de primavera verano y un mes de otoño. En el caso de junio del 2008, la mayor cantidad de horas se pierden en el movimiento del vapor de agua desde el exterior hacia el interior de la cámara. En la parte interior, se pierde la mayor cantidad de horas en el mes en que el vapor de agua se mueva desde el interior hacia la cámara. Es decir, en junio del 2008, si hay un movimiento de salida del vapor de agua desde interior a la cámara y un movimiento de entrada desde el exterior hacia la cámara, la cámara de aire está recibiendo los movimientos desde los dos sentidos. La situación del mes de octubre del 2008, ocurre lo opuesto, es decir, la mayor cantidad de horas que se producen entre la cámara de aire y el exterior es de salida, mientras que entre la cámara de aire y el interior se produce una entrada vapor de agua hacia el interior. En este caso, la cámara de aire dirige hacia los dos sentidos exterior e interior, el movimiento de difusión de vapor de agua. Se puede deducir de todo esto que cuando la cámara de aire tiene poco vapor de agua es receptora del movimiento desde los dos sentidos y cuando la cámara de aire está con la mayor presión de vapor se libera el movimiento en los dos sentidos.

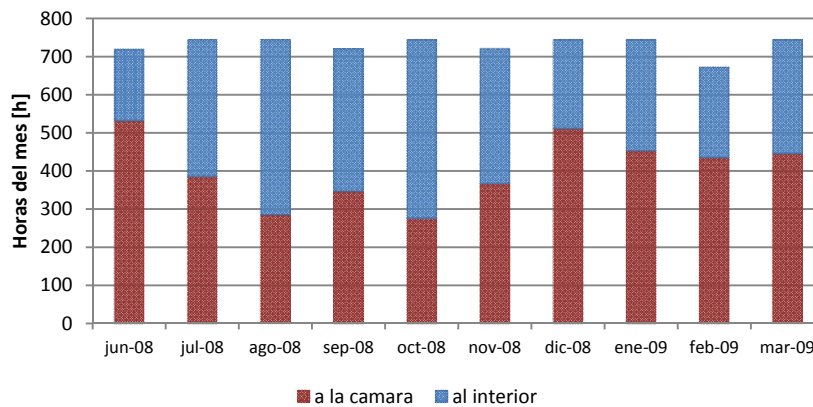


Figura IV.47: Porcentaje de horas en cada mes analizado de la diferencia de presión de vapor de agua Pvc – Pvi. En rojo movimiento de la cámara a la cámara, en azul movimiento del exterior hacia el interior.

Haciendo una valoración del cómputo global de horas y su sentido en las tablas anteriores incluidos los valores recogidos en la monitorización *in situ*, incluso abril y parte de mayo, en total 7990h, se resume en la siguiente figura y tabla el número de horas que tuvo un cierto sentido de flujo y el porcentaje sobre el total del flujo de vapor de agua.

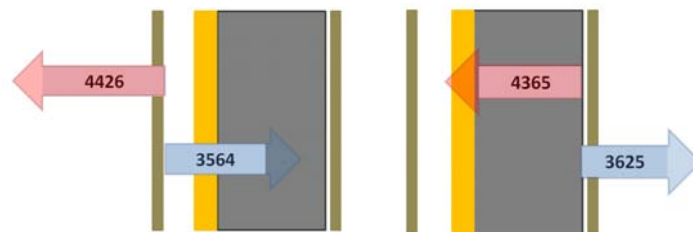


Figura IV.48: Horas totales monitorizadas (7990h) del sentido de flujo de vapor de agua entre el exterior y la cámara (Pve – Pvc) y entre la cámara y el interior (Pvc – Pvi). Mayo 2008 a abril 2009

	Sentido del flujo de vapor	Horas [h]	Porcentaje del total [%]
Pve - Pvc	Flujo al exterior	4426	55,4
	Flujo a la cámara	3564	44,6
Pvc – Pvi	Flujo al interior	3625	45,4
	Flujo a la cámara	4365	54,6

Tabla IV.10: Horas totales monitorizadas (7990h) y porcentaje de sentido de flujo de vapor de agua entre el exterior y la cámara (Pve – Pvc) y entre la cámara y el interior (Pvc – Pvi). Mayo 2008 a abril 2009

De la tabla que representa los datos finales de la diferencia de presiones de vapor entre la cámara y el exterior (Pve – Pvc) se ha hallado que de la totalidad del tiempo invertido en la monitorización para el potencial movimiento de difusión hacia el interior ha sido de 44,6% frente al potencial de difusión hacia el exterior de un 55,4%. De este hallazgo se concluye que, en general, se utiliza casi las mismas horas en un movimiento de flujo de vapor de agua para el potencial mojado, es decir hacia el interior, que para el potencial secado, hacia el exterior. No queda clara la contribución de la ventilación de la cámara para el secado.

Es de reseñar en la validez del hallazgo, que estos resultados recogidos son prácticamente del año ya resta por conocer las horas repartidas entre el mes de mayo y abril que no fueron monitorizadas.

Comportamiento del movimiento del vapor de agua

Realizado el análisis mensual horario del sentido de la difusión del vapor de agua, se han detectado diferentes comportamientos. Estos comportamientos característicos encontrados son hallazgos. Puede decirse que, en general, se ha hallado que existen tres tipos de comportamientos del movimiento de la difusión de vapor de agua entre la cámara y el exterior y se han definido como patrones o comportamientos repetidos.

El **patrón nº1** de difusión de vapor de agua define un sentido del flujo de difusión de vapor de agua de forma continuada desde la cámara y hacia el exterior (ver líneas rojas). Se correlaciona este comportamiento con que la temperatura de la cámara, línea representada en azul, es superior a la temperatura exterior, línea representada en rojo. Es decir, cuando la cámara de aire del cerramiento tiene más temperatura se produce el movimiento de flujo de difusión de vapor de agua hacia el exterior. El origen de esta mayor temperatura de la cámara diaria durante días continuados no puede ser más que el debido al aporte continuado de energía mediante calefacción del recinto contiguo al cerramiento. Menos probable es una bajada brusca de las temperaturas exteriores.

Se ha encontrado este patrón nº1 de comportamiento en la fachada en los meses desde septiembre del 2008 y hasta marzo de 2009. No ha sido de forma continuada a lo largo del mes sino que ha durado varios días en el mes. En el caso de la monitorización de febrero y marzo del 2016 también se ha observado este tipo de comportamiento.

El **patrón nº2** de difusión de vapor de agua advierte un comportamiento continuado de movimiento de difusión de vapor de agua desde el exterior hacia la cámara de aire (ver líneas azules). En este comportamiento la temperatura exterior, representada en rojo, fue superior a la temperatura de la cámara, línea azul. Por ello, el movimiento del flujo de difusión de vapor de agua se produjo hacia el interior de la cámara. El patrón, por tanto, indica que cuando la temperatura exterior es mayor que la de la cámara se produce un flujo de difusión de vapor de agua hacia el interior. Esta situación de mayor temperatura exterior esta intrínsecamente ligada al clima que posee la localización del edificio y al mismo tiempo al no aporte de energía en el recinto contiguo. Se corresponden con días nublados, baja radiación y/o precipitaciones y sin oscilaciones térmicas.

En el caso del patrón nº2 el mes de junio, agosto, octubre, noviembre, enero, febrero y marzo se ha detectado este comportamiento. Ver figura IV.49 del sentido de flujo de vapor de agua.

Finalmente el **patrón nº3** de difusión de vapor de agua caracteriza una alternancia de movimiento de difusión de vapor de agua de forma diaria, correspondiendo características diferentes en el día y la noche (ver líneas azules y rojas alternadas en la figura). En ciertas horas de la noche, la temperatura de la cámara es superior a la del exterior. Hay un momento en que esto se invierte y la temperatura del exterior es más elevada que la de la cámara. La alternancia de los valores de temperatura se correlaciona con la alternancia también del movimiento de difusión de vapor de agua. Los días en los que esto ha sucedido poseen unas oscilaciones térmicas diarias claras y definidas que se relacionan claramente con los movimientos de difusión de vapor de agua.

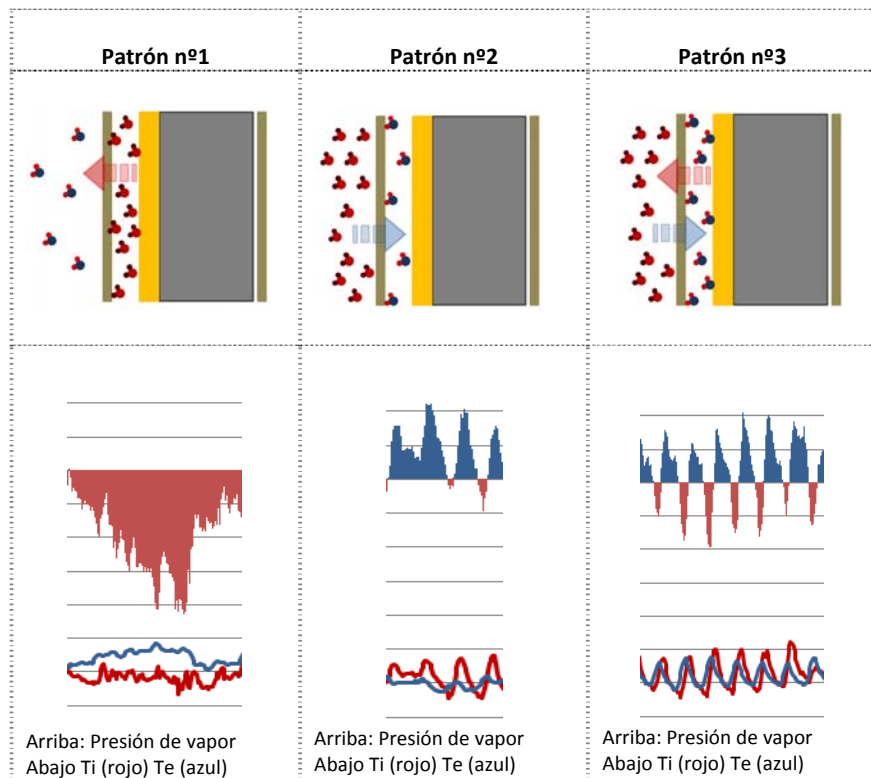


Figura IV.49: Patrones definidos del sentido del flujo de difusión de vapor de agua en la fachada ventilada de granito orientada al norte entre el exterior y la cámara

Para el patrón nº3, todos los meses han tenido ese patrón oscilatorio diario en alguna época. Del análisis del movimiento de la difusión de vapor de agua, se concluye que la temperatura es determinante para conocer el movimiento de la difusión de vapor de agua a través del cerramiento. En concreto, es el uso del recinto con la utilización de la calefacción y la temperatura del ambiente exterior es la que ha condicionado ese movimiento. No se ha advertido un comportamiento único sino diferentes tipos. Estos tipos son los que se han recogido en los patrones indicados del primero al tercero y son los que se han resumido en la figura anterior.

En el caso del movimiento de difusión de vapor de agua entre el ambiente interior y de la cámara de aire, se puede ver que la temperatura también correlaciona con el movimiento de difusión de vapor de agua. En los meses analizados se observan que de los comportamientos se ha podido deducir tres tipos de patrones. Estos patrones son similares a los obtenidos previamente en el caso del movimiento de vapor de agua entre el exterior y la cámara de aire.

En el **patrón nº1** el movimiento de la difusión de vapor de agua va desde el interior hacia la cámara, saliendo (barras rojas). En estos momentos, se observa claramente que la temperatura interior es más elevada que la temperatura de la cámara de aire. Este comportamiento descrito ha sido observado a lo largo de los meses analizados.

En el caso del **patrón nº2**, las barras azules indican que el movimiento de difusión de vapor de agua se dirige hacia el interior del recinto. Aquí la temperatura de la cámara, en sus oscilaciones ha conseguido tener más temperatura que la del interior del recinto. En este caso, es el movimiento de la difusión de vapor de agua la que se dirige hacia el interior. Este comportamiento descrito ha sido observado a lo largo de los meses analizados.

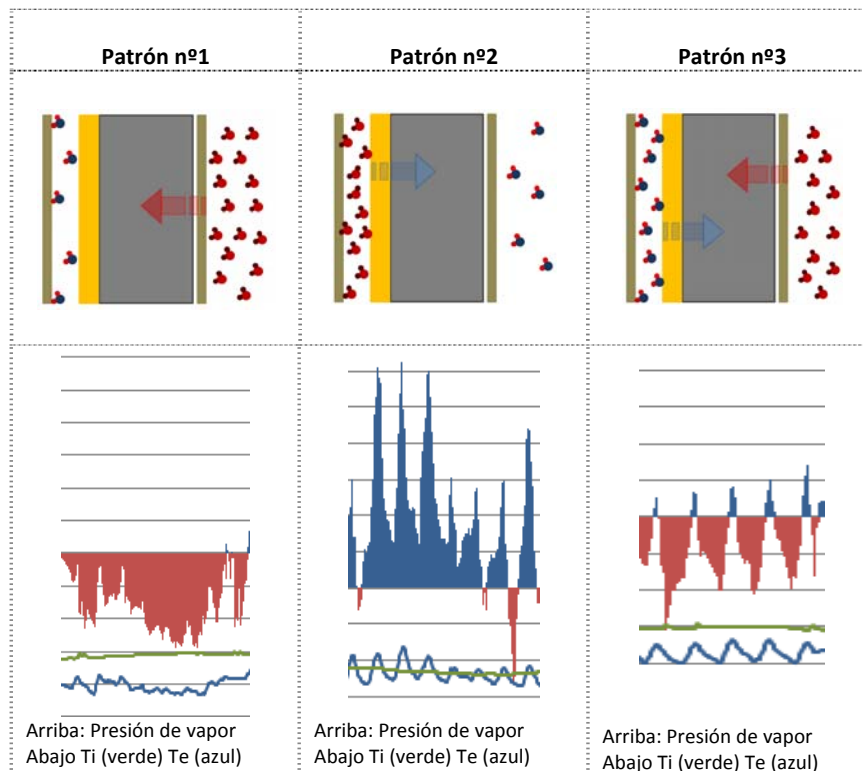


Figura IV.50: Patrones definidos del sentido del flujo de difusión de vapor de agua en la fachada ventilada de granito orientada al norte entre el exterior y la cámara

El **patrón nº3** muestra alternancia en el comportamiento, teniendo momentos en los que el movimiento de difusión del vapor de agua se dirige a la cámara y otros hacia el interior. Las oscilaciones térmicas son correspondidas de forma clara con las alteraciones en los movimientos de difusión de vapor de agua. Cuando la temperatura de la cámara de aire en sus oscilaciones se acerca a la temperatura interior más elevada, el movimiento de la difusión del vapor de agua se dirige hacia el exterior (barras rojas).

Por el contrario cuando la temperatura de la cámara se aleja de la temperatura interior, el movimiento de flujo de vapor de agua se dirige hacia el interior (barras azules). Este comportamiento descrito ha sido observado a lo largo de los meses analizados.

Se concluye también la importancia del valor de las temperaturas para conocer el sentido de la difusión de vapor de agua. Tener la temperatura de la cámara con un valor superior a la del interior provoca que se dirija hacia el interior el vapor de agua. Ello trae el riesgo de mojado del cerramiento. Por el contrario, manteniendo alta temperatura se garantiza que el movimiento de difusión de vapor de agua se dirige hacia afuera y, por lo tanto, evitando el posible riesgo de mojado del cerramiento.

Es de observar finalmente la combinación de ambos comportamientos, observada gráficamente en las figuras IV.44 y IV.45. En el caso de tener un movimiento de vapor de agua desde el interior hacia la cámara, se ve que al mismo tiempo desde el exterior está entrando vapor de agua hacia la cámara. Sucede también la situación opuesta en la que desde la cámara de aire el vapor se introduce al interior del recinto al mismo tiempo que desde la cámara de aire sale vapor de agua hacia el exterior. Estas alternancias han sido bastante comunes en general a lo largo de los meses analizados. Son pocos los momentos en los que el movimiento de vapor de agua se dirige desde el exterior hacia el interior, así como también son pocos los

momentos en los que el movimiento de vapor de agua se ha dirigido desde el interior hacia el exterior.

Movimiento de humedad por difusión de vapor de agua en el cerramiento de fachada ventilada 2016

En el caso de la monitorización in situ realizada en el mes de febrero y marzo del 2016, se ha considerado estudiar también el **movimiento del flujo de vapor de agua** a través de la presión de vapor, datos indirectos que se han obtenido de la temperatura y humedad relativa recogidas.

La figura IV.51, expone los valores de presión de vapor en el exterior (rojo), la cámara (azul) y el interior (verde). Se observa claramente que la línea verde, correspondiendo con la presión de vapor interior, es la de mayor valor. Sólo hay dos periodos en los que las presiones de vapor se acercan en valor, una es alrededor del 23 de febrero y otra el 16 y 17 de marzo del 2016. El tiempo monitorizado muestra claramente la tendencia del mayor valor de presión de vapor en el interior del recinto.

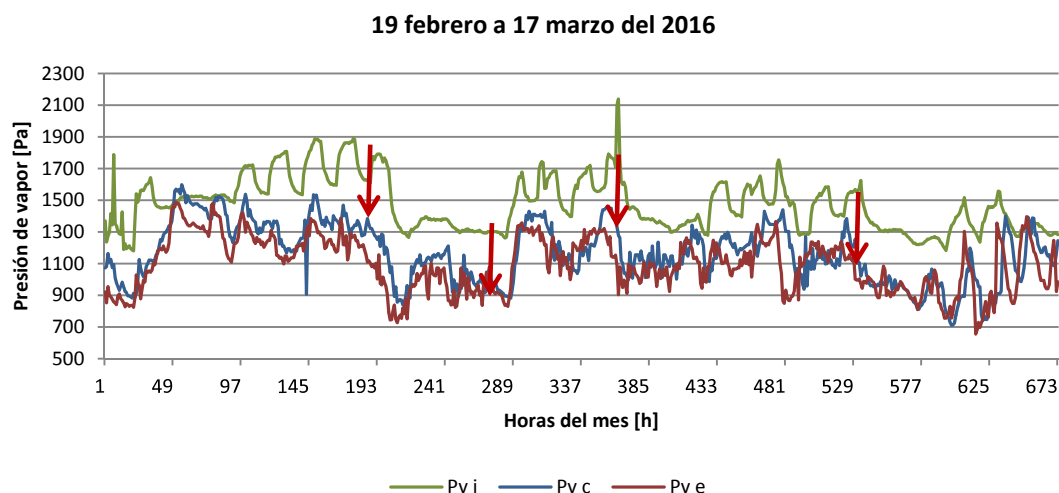


Figura IV.51: Presión de vapor en el ambiente exterior, de la cámara y del interior en la monitorización del 19 de febrero al 17 de marzo del 2016

Observado que el ambiente interior es el que posee más presión de vapor, el movimiento del vapor de agua se produce desde el interior y hacia la cámara ventilada. Las flechas de color rojo mostradas en la figura dan cuenta de este movimiento de difusión de vapor de agua.

Se ha considerado también que el análisis realizado en el año 2008-2009, fuese repetido en este periodo monitorizado del 2016. Se ha representado la diferencia de presión de vapor entre el ambiente exterior y la cámara de aire ventilada. Se observa alternancia de movimiento de vapor de agua hacia el exterior en rojo y hacia el interior en azul. Si bien hay sobre todo en los días finales del mes de marzo una alternancia en los valores de forma diaria como se indicaba en el patrón nº3.

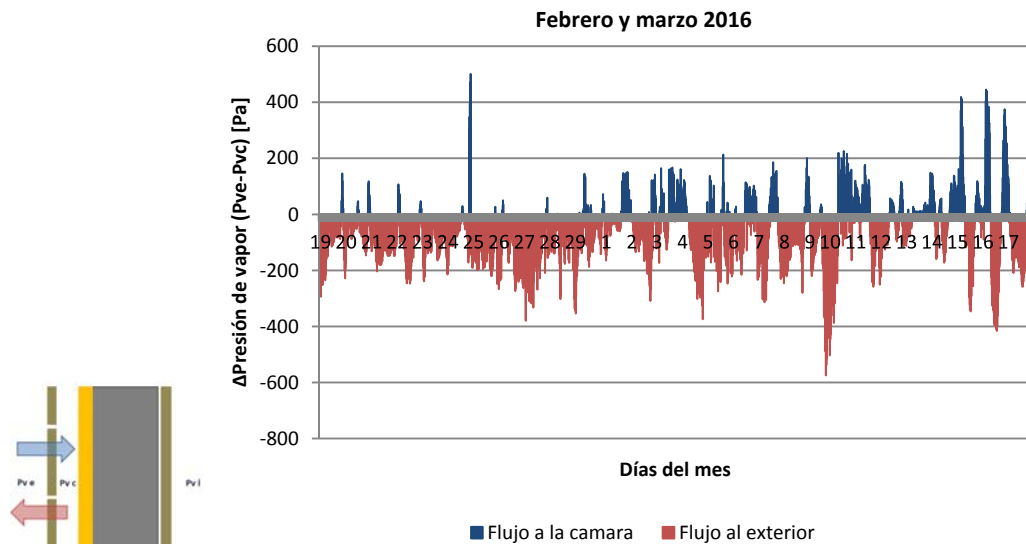


Figura IV.52: Valor y sentido del flujo de vapor de agua desde el 19 de febrero hasta el 17 de marzo del 2016. En rojo saliente de la cámara hacia el exterior y en azul entrante desde el exterior hacia la cámara.

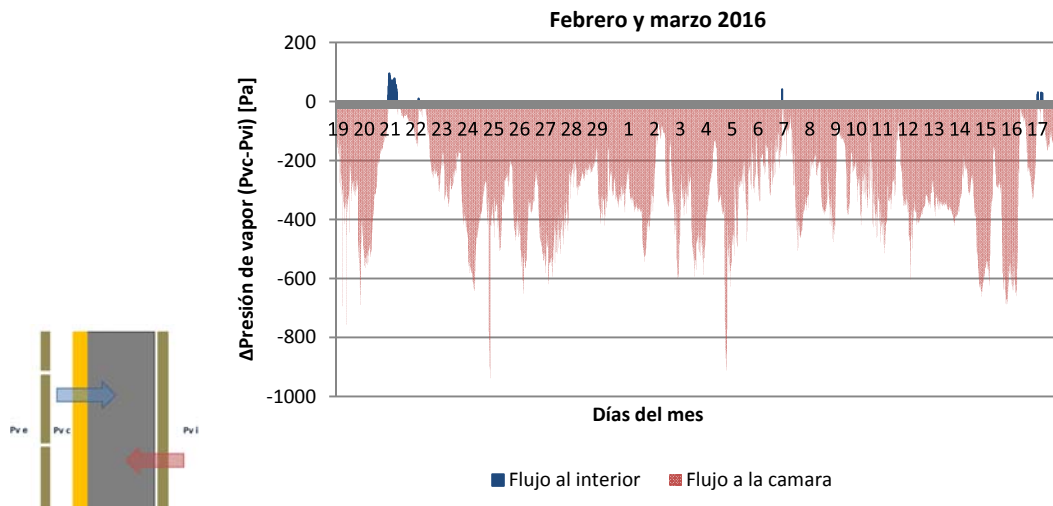


Figura IV.53: Valor y sentido del flujo de vapor de agua desde el 19 de febrero hasta el 17 de marzo del 2016. En rojo saliente del interior hacia la cámara y en azul entrante desde la cámara hacia el interior.

Se ha observado también la diferencia de presión de vapor entre el interior y la cámara de aire. Prácticamente la totalidad del movimiento sucedido en este periodo es desde el interior y hacia la cámara de aire ventilada. Sólo hay un pequeño flujo inverso que coincide con el domingo 21 de febrero, la calefacción no estaba puesta. En el caso del día 7 de marzo es lunes que es cuando se encendía.

Se puede concluir que el sentido del movimiento del vapor de agua en el cerramiento, sobre todo entre la cámara y el interior es claramente hacia la cámara, mostrando la figura las barras de color rojo, una tendencia hacia el secado. No es tan evidente este comportamiento entre la cámara y el exterior, existiendo momentos en el día donde el vapor de agua se introduce en la cámara de aire.

Se ha dispuesto también la tabla con los valores promedios del tiempo monitorizado. Se ha representado también las horas en las que el movimiento de vapor de agua estaba en un sentido. La figura siguiente muestra todas las horas que fueron monitorizadas (671,75h) con su sentido de flujo

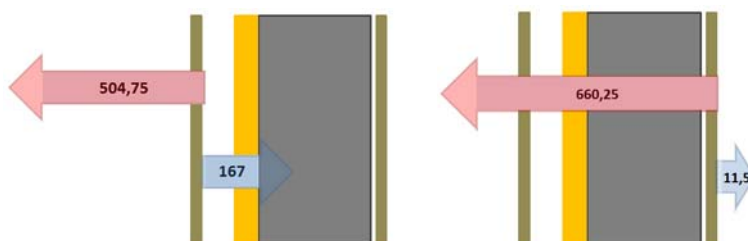


Figura IV.54: Horas monitorizadas con sentido de flujo de vapor de agua entre el exterior y la cámara (Pve – Pvc) y entre la cámara y el interior (Pvc – Pvi). Días del 19 febrero al 17 marzo 2016

[Pa]	Sentido del flujo de vapor	Horas [h]	Porcentaje del total [%]
Pve – Pvc -71	Flujo al exterior	504,75	75,1
	Flujo a la cámara	167	24,9
Pvc – Pvi -309	Flujo al interior	11,5	1,7
	Flujo a la cámara	660,25	98,3

Tabla IV.11: Valor promedio de diferencia de presión de vapor, horas totales monitorizadas (671,75h) y porcentaje de sentido de flujo de vapor de agua entre el exterior y la cámara (Pve – Pvc) y entre la cámara y el interior (Pvc – Pvi). Días del 19 febrero al 17 marzo 2016

Estos son resultados recogidos que resumen el periodo del 19 de febrero al 17 de marzo del 2016. Se corresponde con un flujo de vapor hacia el exterior fundamentalmente. La calefacción dispuesta durante la monitorización *in situ* ha provocado la elevación de la temperatura interior y como consecuencia también la capacidad de contener vapor de agua el local y mayor presión de vapor. El flujo de vapor de agua es, por lo tanto, claramente hacia el exterior.

Comparativa con el mismo periodo 19 de febrero al 17 de marzo del 2009

Se ha realizado una tabla que indica los valores de este periodo en los dos años diferentes monitorizados. Los valores promedio obtenidos son diferentes tanto en el caso de la diferencia de presiones entre el exterior y la cámara, como del interior y la cámara, habiendo menos diferencia entre el interior y la cámara. Sin embargo, es considerable la diferencia de las horas en el sentido del movimiento de vapor de agua. En la diferencia entre el exterior y la cámara, se han reducido en el 2016 las horas de movimiento desde el exterior hacia la cámara. En el caso del movimiento hacia el interior del recinto, también ha sido considerable esa reducción. Pueden observarse los valores en la tabla IV.12:

	Pve - Pvc Valor promedio [Pa]		Pvc - Pvi Valor promedio [Pa]	
19 FEBRERO a 17 MARZO 2016	-71		-309	
	A la cámara Horas [h]	Al exterior Horas [h]	Al interior Horas [h]	A la cámara Horas [h]
	172	500	11	661
19 FEBRERO a 18 MARZO 2009	-10		-258	
	357	315	178	494

Tabla IV.12: Valores promedio del 19 febrero a 17 marzo del 2009 y 2016 de la diferencia de presión de vapor de agua [Pa] y número de horas del sentido del flujo de vapor de agua

La figura IV.55 muestra las diferencias de presión de vapor de agua para el caso del exterior con la cámara y de la cámara con el interior. En la diferencia de presiones entre la cámara y el interior, se observa que es en el año 2016 donde mayoritariamente el movimiento del flujo de vapor de agua se dirige a la cámara. La elevación de la temperatura en la sala para la conseguir obtener una diferencia térmica entre el exterior y el interior significativo, ha hecho que la sala haya sido mantenida con calefacción. El uso normal de esa sala no supone la calefacción diaria. No es el caso del año 2009, donde no se interfirió en su uso habitual. En el caso de las diferencias de presiones de vapor de agua entre el exterior y la cámara aumenta en los dos casos el flujo de vapor hacia la cámara, es decir, el flujo de mojado. Es en la monitorización del 2009 donde se advierte las mayores horas de entrada del vapor de agua.

De esta comparativa, se concluye que el uso del edificio y en concreto la calefacción ha variado el potencial de mojado y secado en el cerramiento de fachada ventilada.

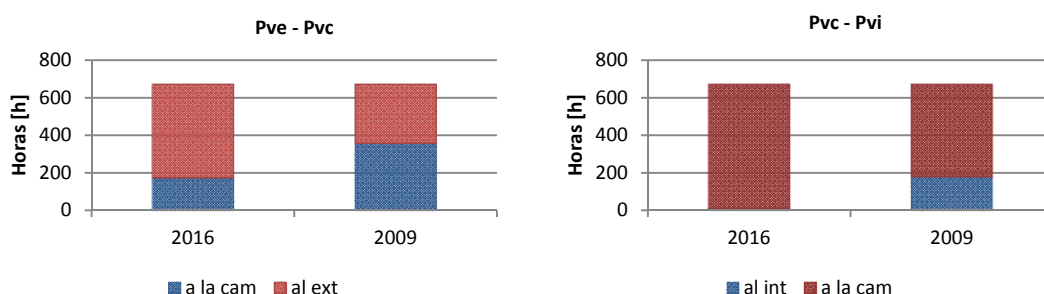


Figura IV.55: Número de horas del sentido de flujo de vapor de agua entre el exterior y la cámara y entre la cámara y el interior en los periodos monitorizados 18 febrero a 18 marzo 2009 y 2016

En el caso de las diferencias entre la cámara y el interior las 178h de movimiento de vapor de agua al interior en 2009, que representan un 26,5% de las horas totales se han reducido a tan sólo 11h en 2016 representando ahora un 1,6%. En el caso de las diferencias entre el exterior y la cámara, las 357h de movimiento de vapor de agua hacia la cámara que representaban un 53,1% de las horas totales, se ha reducido en 172h, significando en 2016 un 25,6% de las horas.

De todo lo expuesto en este apartado, **se puede resumir** que:

En cuanto a los valores de presión de vapor, los meses de octubre, noviembre, diciembre y parte de enero han mostrado valores en la cámara y en el ambiente exterior más próximos a la presión de vapor de saturación. Por el contrario, los meses de verano han tenido la mayor diferencia entre la presión de vapor existente y la presión de vapor de saturación. La presión de vapor interior se ha mostrado más elevada cuando ha existido calefacción o en los meses de verano, correspondiendo con las altas temperaturas.

En cuanto a la dinámica de difusión de vapor de agua a lo largo del tiempo se han advertido comportamientos diferentes que han sido recogidos en tres tipos. Estos patrones reflejan las tendencias observadas en el cerramiento, correspondiendo con las temperaturas y resume el comportamiento anual.

Para responder a la pregunta si la cámara ventilada contribuye al secado del cerramiento, se analizó la difusión del vapor de agua a partir de las diferencias de presión entre el exterior y la

cámara. El potencial movimiento de difusión recogido hacia el interior fue de 44,6% frente al potencial de difusión hacia el exterior de un 55,4%. De este hallazgo se concluye que, en general, se utiliza casi las mismas horas en un movimiento de flujo de vapor de agua hacia el interior, que hacia el exterior. No queda clara la contribución de la ventilación de la cámara para el secado.

Comparando las diferencias de presión de vapor de las dos monitorizaciones realizadas en el mismo tiempo pero en años diferentes 2009 y 2016, se concluye que el uso del edificio y en concreto la utilización de la calefacción ha variado la difusión del flujo de vapor de agua en la cámara ventilada del cerramiento de fachada ventilada, incrementando en la cámara de aire a un 75% del total de las horas en la difusión del vapor de agua hacia el exterior.

IV.3 MEDICIÓN DE TEMPERATURAS SUPERFICIALES Y DENSIDAD DE TASA DE FLUJO DE CALOR

La tercera parte del capítulo IV tiene como objetivo fundamental conocer y cuantificar la densidad de tasa de flujo de calor que ha atravesado la fachada ventilada de granito en la orientación norte en A Coruña.

El apartado expone, por tanto, los resultados obtenidos en la segunda campaña de monitorización *in situ* realizada entre el día 1 de febrero hasta el 17 de marzo de 2016.

Como se indicó en el capítulo tercero, debido a errores de signo y magnitud encontrados en los datos de la densidad de tasa de flujo de calor de la segunda monitorización, se procedió nuevamente a realizar una **tercera monitorización** para la fachada ventilada de granito esta vez entre el 19 de enero y el 6 de febrero del 2017, un año después de la anterior toma de datos.

El objetivo fue recopilar nuevamente medidas de temperatura, humedad relativa y densidad de tasa de flujo de calor en la fachada ventilada de granito. Se buscaba obtener un patrón diario característico de comportamiento higrotérmico, en particular, de la densidad de tasa de flujo de calor. También se buscaba obtener un valor de transmitancia térmica o valor U fiable y corregir los errores advertidos en la anterior recogida de datos.

El apartado trata primeramente, con los resultados de la segunda monitorización, de un análisis de las temperaturas superficiales del cerramiento utilizando los valores recogidos de los seis sensores de flujo dispuestos. La tercera monitorización analiza nuevamente las temperaturas superficiales del cerramiento y en concreto en dos localizaciones. Se correlacionan la temperatura exterior, interior y superficial interior con el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor exterior e interior. Se exponen los hallazgos encontrados. El apartado termina con una síntesis crítica del capítulo.

En concreto, la línea argumental del apartado trata de responder a las siguientes preguntas:

- . ¿Cuáles han sido las temperaturas superficiales en el granito interior donde se tomaron las mediciones?, ¿existen grandes diferencias según la altura del nivel del suelo?
- . ¿Cuál ha sido el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor interior en el cerramiento?, ¿existe un patrón de comportamiento?, ¿hay diferencias de recogida de la densidad de tasa del flujo según se disponga el lugar para la medición?
- . ¿Existe diferencia entre la densidad de tasa de flujo de calor obtenida del interior con la de la superficie exterior del aislamiento de poliuretano?, ¿Cuál es su cuantificación y qué relación existe de este flujo con la totalidad de la densidad del flujo interior?
- . ¿La humedad relativa y/o precipitaciones influyen en la densidad de tasa de flujo de calor? ¿Podría la humedad relativa explicar el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor?

El contexto de la monitorización

Durante el invierno 2015-2016, tiempo en el que se registran las temperaturas más bajas en A Coruña, se decide monitorizar la densidad de flujo de calor en el cerramiento analizado. En los años precedentes se detectó que no se producían temperaturas bajas hasta el mes de enero. Finalmente y coincidiendo con el retraso de la bajada de temperaturas anuales fue monitorizado el mes de febrero y parte del mes de marzo del 2016. Es de reseñar que, de todo este tiempo, se ha advertido una dificultad en la toma de datos cuando existiese una diferencia de temperatura de 10°C o más entre el ambiente interior y el ambiente exterior.

La segunda campaña de monitorización se inició el día 1 y 2 de febrero, momento en el que los aparatos se pusieron en funcionamiento. Se realizaron recogidas de datos cada minuto para detectar cualquier error de posición o de medida. A partir del día 3 de febrero del 2016, se realizó la recogida de datos cada 15 minutos. Hasta el día 15 de febrero y tras el análisis de los datos recogidos y a la vista la dificultad de producir un salto térmico de menos 10°C, se decide encender durante el día tres de los cuatro radiadores en la sala, además de incorporar dos más de apoyo junto al cerramiento. Desde el día 16 de febrero y hasta el 7 de marzo, se realiza la monitorización con el apoyo de la calefacción. A partir del día 8 y hasta el día 17 de marzo se apaga la calefacción de refuerzo y se disponen juntos, de tres en tres, para verificar si alguno de los sensores daba errores de medida.

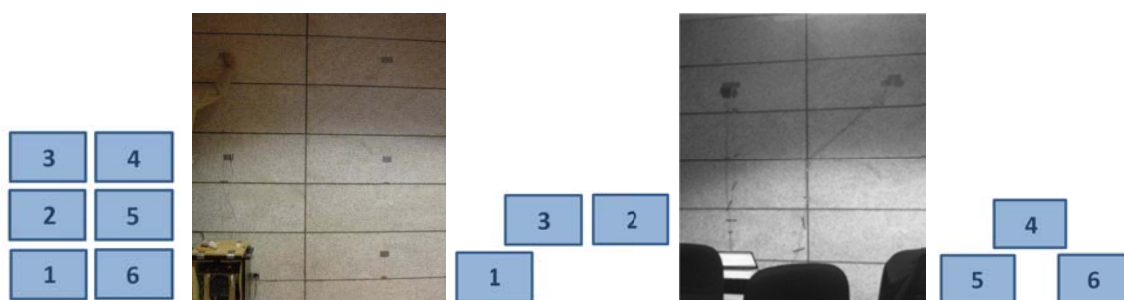


Figura IV.56: Posiciones de los sensores de flujo de calor y temperaturas superficiales en el cerramiento en el periodo primero y segundo (izquierda) y tercero (derecha)

Puede verse representada en la figura IV.56 la concreta localización de los sensores, así como su posición con respecto al suelo. A la izquierda de la figura está marcada la localización de los sensores en el periodo primero y segundo. En la derecha la posición de los sensores en el tercer periodo. A continuación se da cuenta de los datos obtenidos de temperatura superficial y densidad de tasa de flujo de calor

IV.3.1 TEMPERATURAS SUPERFICIALES INTERIORES

La figura IV.57 muestra las temperaturas superficiales recogidas por los seis sensores tipo HFS-4 en el granito sin aporte alguno de energía. Desde el 4 al 15 de febrero del 2016, no se produjo aporte de energía. No se aprecia una oscilación clara de forma diaria. Sólo se advierte una elevación de las temperaturas el día 6 de febrero. A partir del 16 de febrero y hasta el final de la prueba, se ven oscilaciones diarias, correspondiendo con el aporte de energía de calefacción.

Las medidas registradas por el sensor de densidad de tasa de flujo de calor de la posición 1 han dado valores muy elevados. El aparato está físicamente pegado al registrador de datos tipo DT-85. La emisión de calor de este aparato ha causado interferencia en la medición, por lo que este grupo de medidas han sido rechazadas.

A continuación se procede a realizar un análisis de los resultados obtenidos atendiendo a los tres periodos registrados en la toma de datos.

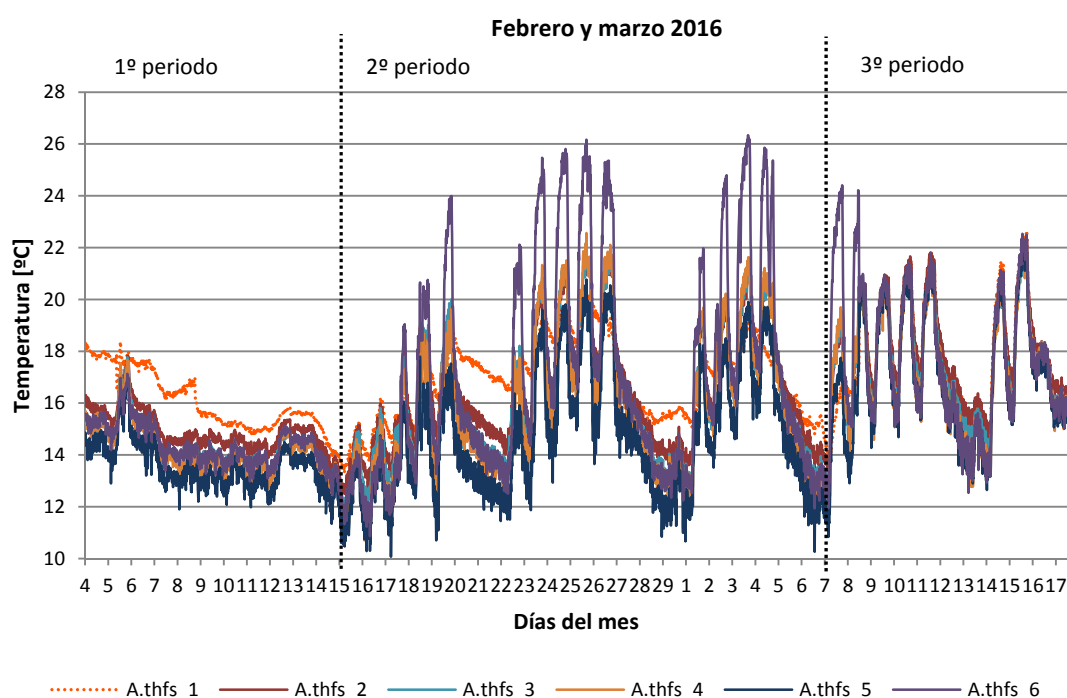


Figura. IV.57: Temperaturas superficiales interiores en °C en la posición de los medidores de flujo de calor. Mediciones tomadas entre el 4 de febrero al 17 de marzo del 2016

Primer periodo 2 al 15 de febrero del 2016 sin calefacción

El diagrama de barras representado en la izquierda de la figura IV.58 expresa los valores promedio obtenidos de cada posición en altura. Los colores indican los valores de temperaturas superficiales en el granito a la altura correspondiente. En el caso de la altura 0,64m, tal y como se ha dicho, se ha descartado la posición 1 debido a la interferencia que ha causado en la toma de datos de la temperatura superficial. Los valores de desviación de los promedios indicados han sido en la posición 1,50m de 0,46m y la posición 2,35m también de 0,46m. En el caso de la desviación con otros tipos de aparatos PT-100, la posición 1,50m ha tenido una desviación de 0,20 y la posición más alta de 0,21m. En la toma de datos de estos sensores HFS-4 las diferencias entre las alturas son muy pequeñas.

Segundo periodo del 16 de febrero al 7 de marzo del 2016 con calefacción

En el diagrama de barras de la parte derecha de la figura IV.58 se expresan los promedios obtenidos de las temperaturas superficiales en el 2º periodo de calefacción, a 1,50m (posiciones 2 y 5) y a 2,35m (posiciones 3 y 4). Como en el caso anterior, se ha eliminado los

valores recogidos de la posición más cerca del suelo. Con respecto al diagrama de barras de la parte izquierda las temperaturas superficiales promedio recogidas con el HFS-4, se muestran unas desviaciones mayores que en el otro tipo de aparato registrado.

En los dos diagramas de barras mostrados en la figura IV.58 se detecta la misma tendencia. Los sensores HFS-4 muestran un aumento de temperatura superficial en relación al aumento de altura de la sala.

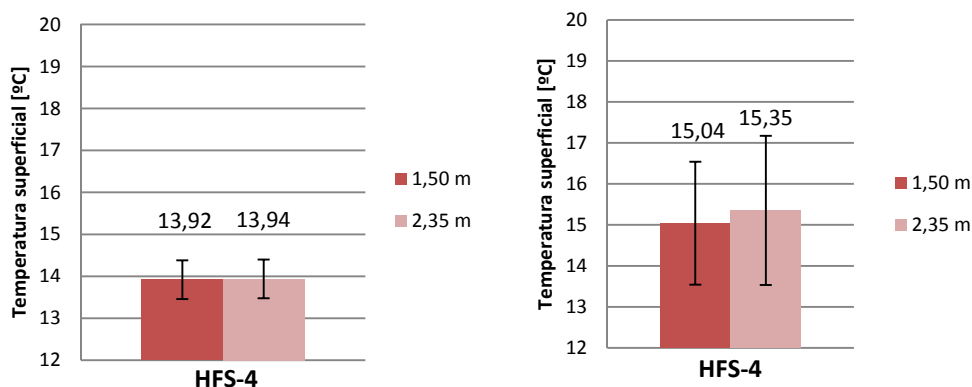


Figura IV.58: Medias y desviación típica de las temperaturas superficiales en el 1º periodo sin calefacción (izquierda) y 2º periodo con calefacción (derecha) por estratificación de alturas y tipo de aparato registrado

Tercer periodo del 8 al 17 de marzo del 2016. Periodo de chequeo y confirmación de la medición

Desde el día 8 al 17 de marzo del 2016, se realizó un periodo de chequeo. Este periodo supuso situar los registradores de datos en un mismo lugar para verificar que la medida que se estaba produciendo era fiable y que durante la duración del ensayo no se había producido algún deterioro en la instrumentación de recogida de datos. La situación fue la siguiente. En las posiciones superiores (3-4) se colocaron por columnas y juntas según la figura IV.55 y figura IV.58 indicada a continuación.

Los datos obtenidos de temperatura superficial en °C y recogidos en esas posiciones desde el día 8 al 17 de marzo del 2016 mostraron una uniformidad en el comportamiento térmico, aunque los valores que se obtuvieron no fueron iguales. Los valores de la columna de la izquierda tienen mayor variación de valor que los de la columna de la derecha. Puede observarse la figura siguiente.

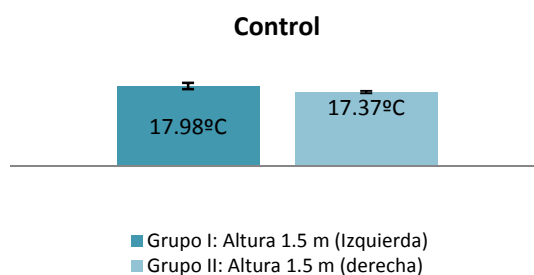


Figura IV.59: Valores promedio de temperatura superficial en el aplacado de granito registrado en la posición 3 (izquierda) y posición 4 (derecha) del 8 al 17 de marzo del 2016

Se concluye del análisis de las temperaturas superficiales que en las dos situaciones con y sin calefacción, ha existido una estratificación por alturas con los sensores HFS-4. Ha existido una uniformidad en el comportamiento de todas las posiciones. Sin embargo, el valor de la medida difiere.

En el caso de la campaña de monitorización tercera, una de las pruebas iniciales que se realizaron, previos a la colocación de los sensores, fue reconstruir un mapa de temperaturas superficiales por el interior del cerramiento. Esta prueba fue repetida otra vez el día 3 de febrero del 2017. La figura IV.60 muestra el rango térmico obtenido en la superficie del cerramiento en contacto con el exterior.

C4	C3	C2
18,60	18,85	19,30
18,75	18,90	19,20
18,60	18,85	19,00
18,60	18,60 (HFS3)	18,75 (HFS 2)
18,40	18,45	18,60
18,00	18,10	18,30
17,40	17,55	17,95

Figura IV.60: Alzado interior de la fachada ventilada de granito norte. Datos de temperatura superficial de granito en [°C] el 3 de febrero del 2017 obtenidas con termómetro infrarrojos. Posición de los sensores de densidad de tasa de flujo de calor HFS2 y HFS3.

Es curioso observar en la figura cómo los valores ascienden con la altura, mostrando la existencia de una estratificación térmica en vertical en cada columna de los aplacados de granito. También los datos recogidos con otro tipo de sensores de temperatura (PT-100) han encontrado también una estratificación de temperaturas según la altura.

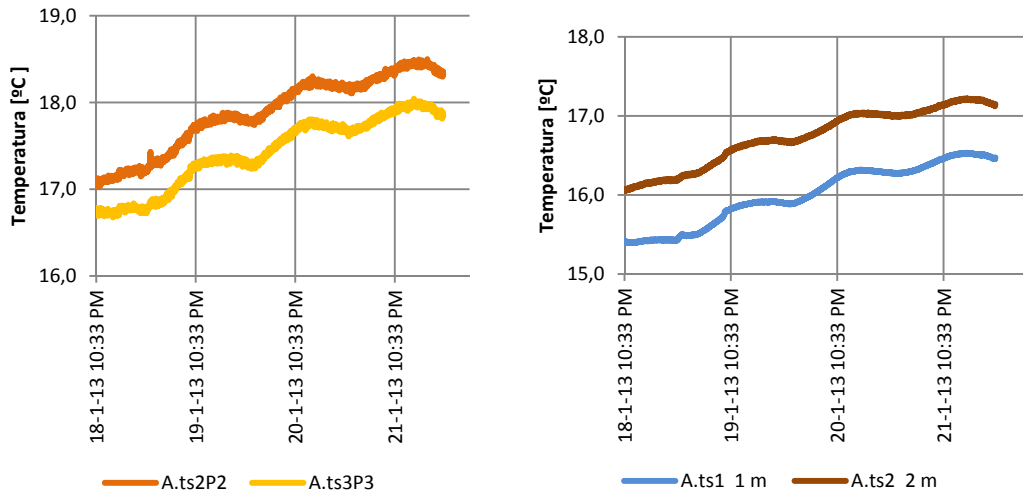


Figura IV.61: Estratificación de temperaturas superficiales de los sensores de flujo de calor HFS2, HFS3 (variación horizontal) izquierda y PT-100 (variación en altura) derecha, del 18 al 21 de enero del 2017

En el caso horizontal, existe también un aumento de valor a medida que el cerramiento se dispone de izquierda a derecha. Se ha recogido un incremento de la variación de aproximadamente $0,7^{\circ}\text{C}$ hacia la derecha del cerramiento. Esto está mostrado en la parte izquierda de la figura IV.60

Los valores de las temperaturas superficiales mostraron una variabilidad desde $17,40^{\circ}\text{C}$ hasta $19,30^{\circ}\text{C}$. El valor medio de todos los datos fue de $18,51^{\circ}\text{C}$ y la mediana o percentil 50% de $18,60^{\circ}\text{C}$.

Estos resultados llevaron a la elección de las posiciones que mejor representan al cerramiento. En la figura IV.60 están indicados los lugares medios de los aplacados utilizados.

Para confirmar estos resultados, se corroboraron con la recogida continua de temperaturas mediante un termómetro de infrarrojos el día 19 de enero del 2017 a las 17.00h.

Se observó la misma tendencia que la figura anterior. Se advirtió una estratificación vertical, según la altura, correspondiendo las temperaturas más bajas con las menores alturas y las temperaturas más altas con las alturas mayores. En el caso de la estratificación horizontal, también se observa que la temperatura se incrementa hacia la derecha del cerramiento.

Con estos datos, se puede resumir que el cerramiento no posee unas temperaturas superficiales uniformes a lo largo de su dimensión, observándose dos estratificaciones, una horizontal hacia la derecha y otra vertical hacia arriba.

Representados los valores de la monitorización tercera, se analiza ahora el comportamiento de las diferentes temperaturas ambientales y superficiales a lo largo del tiempo. Inicialmente en la figura se observó que la temperatura superficial del sensor hfs en la posición 2 poseía un valor superior al de la temperatura ambiental. Revisadas las pruebas pretest, donde todos los sensores se dispusieron en el mismo punto, se advirtió de la necesidad de colocar una corrección. La figura representada ya ha incorporado el valor de temperatura superficial corregido.

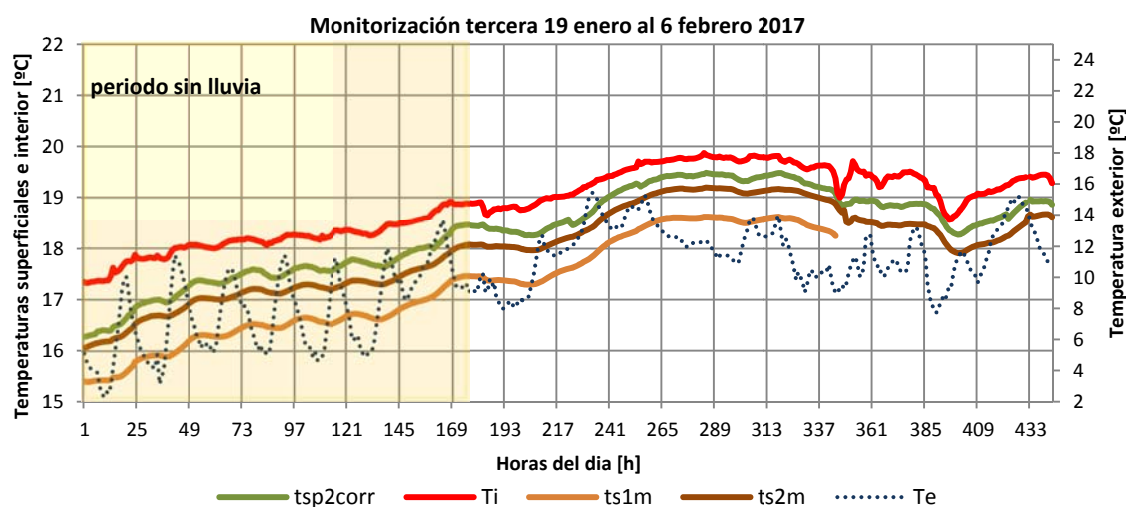


Figura IV.62: Temperaturas superficiales interiores y ambientales exterior e interior de la fachada ventilada de granito de la monitorización tercera 19 de enero al 6 de febrero del 2017.

La representación de la figura muestra como existen oscilaciones térmicas diarias pero el valor medio de la temperatura interior y las temperaturas superficiales tienen un marcado ritmo ascendente. Es de aclarar también los pequeños ruidos que la curva de temperatura interior ha mostrado. En ella puede verse que el acceso al salón de grados muestra una alteración en la toma de medida. Las temperaturas exteriores recogidas, asignada al eje secundario, han sido excepcionalmente bajas, con unas oscilaciones diarias marcadas. Durante este tiempo no se ha producido lluvia.

Disponiendo los datos estadísticos de las variables de temperatura interior y exterior horarias se puede resumir cómo han sido estas variables en la tabla IV.13. Los valores medios indican que durante ese tiempo la diferencia media de temperaturas entre el interior y el exterior ha sido caso de 10°C. Las variaciones de la temperatura interior han sido pequeñas de aproximadamente un grado y medio. En el caso de las exteriores la oscilación ha sido mayor, alrededor de cinco grados.

Temperatura exterior T_e [°C]										
Nc=95% ($\alpha=0,05$) N=324										
Media (St e)	Md	S^2	Std	Max	Min	Rango	Rango intercuartil	Q1 (P ₂₅)	Q2 (P ₅₀)	Q3 (P ₇₅)
9,71 (0,17)	9,9	10,19	3,19	16,35	2,79	13,56	4,75	7,47	9,9	12,23
Temperatura interior T_i [°C]										
Nc=95% ($\alpha=0,05$) N=324										
Media (St e)	Md	S^2	Std	Max	Min	Rango	Rango intercuartil	Q1 (P ₂₅)	Q2 (P ₅₀)	Q3 (P ₇₅)
18,76 (0,04)	18,7	0,58	0,76	20,16	17,42	2,73	1,59	18,06	18,7	19,6

Media; (St e): error estándar; Md: mediana; S^2 : varianza; Std: desviación estándar; Max: máximo; Min: mínimo; Q1: cuartil 1; Q2: cuartil 2; Q3: cuartil 3; Nc: nivel de confianza; α : nivel de significación; N número de datos válidos de la prueba

Tabla IV.13: Valores descriptivos de la temperatura interior y temperatura exterior de la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

Si se representa de forma individualizada los valores recogidos de temperatura exterior e interior en un día, se puede obtener en la figura IV.63 el retardo que este cerramiento tiene.

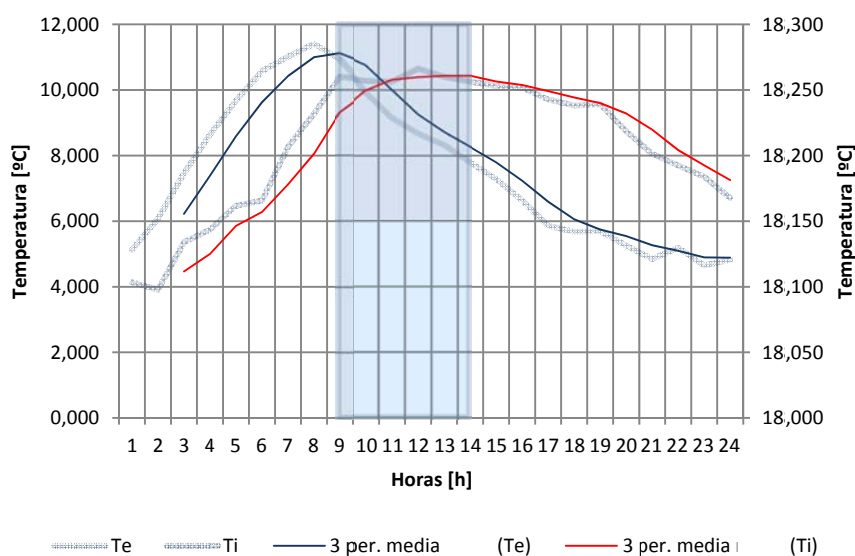


Figura IV.63: Retardo de temperatura interior en la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

El **retardo térmico** mide el tiempo que transcurre entre el valor de pico de la T_i y el valor de pico de la T_e . Los diferentes días analizados han mostrado unos retardos térmicos de la fachada ventilada de granito analizada de aproximadamente cuatro horas. Este valor es elevado, en relación a otros cerramientos. La temperatura exterior se representa en la figura siguiente de color azul. La temperatura interior de color rojo. Realizados estudios estadísticos buscando los picos máximos de temperaturas se comprobó que es exactamente de cuatro horas y 23 minutos.

Se concluye en la monitorización tercera que el valor de retardo térmico obtenido es de tres horas.

IV.3.2 DENSIDAD DE TASA DE FLUJO DE CALOR

Densidad de tasa de flujo de calor y temperatura

A continuación se procede a analizar la relación entre las temperaturas y la densidad de tasa de flujo de calor. La figura IV.64 muestra una línea verde que indica la densidad de tasa de flujo de calor interior q_i y q_{i3} , en línea naranja la densidad de tasa de flujo de calor exterior q_e , así como la temperatura exterior (rojo) e interior (azul a línea discontinua).

Se detecta que la densidad de tasa de flujo de calor interior ha sido siempre negativa, es decir, de salida del flujo del interior hacia el exterior. Es de observar que cuando se producen las mayores temperaturas exteriores, se produce también los mayores valores de salida de densidad de tasa de flujo de calor.

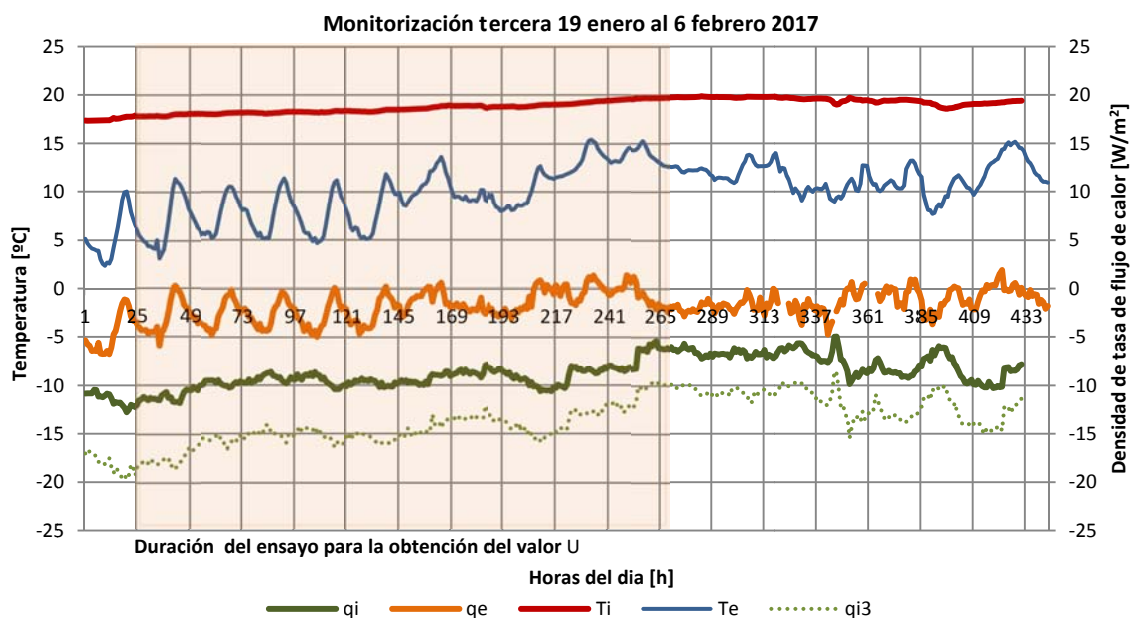


Figura IV.64: Valores de temperatura interior, temperatura exterior, densidad de tasa de flujo de calor interior y exterior en la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

No ha sucedido así en el caso de la densidad de tasa de flujo de calor exterior donde en algunos momentos ha tenido valores positivos, (ver línea naranja).

Si se representase el sentido del flujo obtenido durante el tiempo de monitorización en una sección del cerramiento puede observarse como sería. En verde se representa el sentido tomado por la densidad de tasa de flujo de calor interior y en amarillo por la densidad de tasa de flujo de calor exterior.

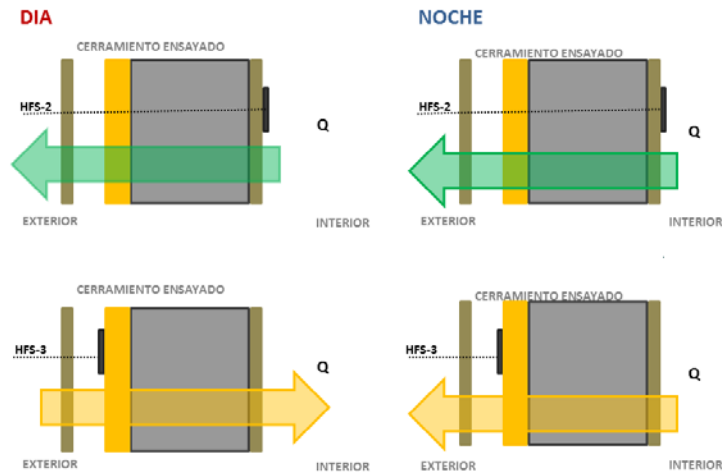


Figura IV.65: Sentido del flujo según posición del sensor y parte del día. Verde q_i y amarillo q_e

La tabla IV.14 da cuenta de los valores estadísticos de estas dos variables obtenidas de forma horaria. Se han deducido unos los valores medios de $q_i = -8,74 \text{ W/m}^2$ y de $q_e = -1,84 \text{ W/m}^2$. La tabla recoge también los valores máximos y mínimos obtenidos así como se distribuyen los valores mayoritariamente entre el percentil P_{25} al P_{75} .

Densidad de tasa de flujo de calor exterior $q_e \text{ [W/m}^2\text{]}$										
Nc=95% ($\alpha=0,05$)						N=324				
Media (St e)	Md	S^2	Std	Max	Min	Rango	Rango intercuartil	Q1 (P_{25})	Q2 (P_{50})	Q3 (P_{75})
-1,84 (0,07)	-1,83	2,02	1,42	1,35	-4,94	6,24	1,84	-2,69	-1,83	-0,84
Densidad de tasa de flujo de calor interior $q_{iz} \text{ [W/m}^2\text{]}$										
Nc=95% ($\alpha=0,05$)						N=324				
Media (St e)	Md	S^2	Std	Max	Min	Rango	Rango intercuartil	Q1 (P_{25})	Q2 (P_{50})	Q3 (P_{75})
-8,74 (0,08)	-8,93	2,56	1,60	-5,38	-12,76	7,37	2,46	-9,83	-8,93	-7,36

Media; (St e): error estándar; Md: mediana; S^2 : varianza; Std: desviación estándar; Max: máximo; Min: mínimo; Q1: cuartil 1; Q2: cuartil 2; Q3: cuartil 3; Nc: nivel de confianza; α : nivel de significación; N número de datos válidos de la prueba

Tabla IV.14: Valores descriptivos de densidad de tasa de flujo de calor interior y exterior de la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

Particularmente en este caso, y analizando todos los datos, el comportamiento gráfico de la densidad de tasa de flujo de calor podría ser un efecto asociado de dos componentes, es decir, una curva compuesta por dos superpuestas. Una primera línea de tendencia de ciclo largo que soporta a la otra de forma alterna y sinuosa diaria y de ciclo corto.

La componente de tendencia se relaciona con la diferencia de temperaturas ($T_i - T_e$), sube cuando la diferencia de temperaturas es alta y baja cuando la diferencia se hace menor. La componente de ciclo corto incrementa su amplitud cuando se hace mayor la diferencia entre $T_i - T_e$.

Los retardos en esta fachada con muro de hormigón armado originan un comportamiento de flujos y temperaturas con mayores retardos que en otras fachadas estudiadas con menores masas térmicas contrariamente a lo que sucede en el caso del cerramiento de vidrio es casi inobservable.

Para conocer el comportamiento de las densidades de tasa de flujo de calor interior y exterior en un ciclo diario se ha representado la figura IV.65. Además se ha representado la temperatura interior y exterior. Las figuras representan dos situaciones. La primera a la izquierda, responde a un comportamiento diario soleado en el que se observa claramente una oscilación diaria de la temperatura exterior (azul). La figura de la derecha no advierte esa oscilación diaria, ya que se corresponde con un día nublado, situación bastante característica en la localización de A Coruña.

Se observa que la temperatura interior se ha mantenido estable con un valor constante en las dos situaciones. En el primer ciclo soleado con un valor aproximado de 18°C y en el segundo ciclo nublado con un valor de 20°C.

Con respecto a la densidad de tasa de flujo de calor exterior (naranja) se comporta en fase con la curva de la temperatura exterior. Es evidente este hecho en el ciclo soleado. En el análisis del comportamiento nublado, también sigue la tendencia de la temperatura exterior. Se han llegado a valores positivos en este ciclo, es decir, de un movimiento del flujo en dirección entrada al salón de grados, cuando la diferencia de temperatura entre el exterior e interior se ha reducido.

Los valores de densidad de tasa de flujo de calor interior (verde) registrados han sido siempre negativos, es decir, de movimiento de salida del flujo del salón de grados. En el caso del ciclo soleado, se ha comportado ligeramente en contrafase con la temperatura exterior. Lo mismo ha sucedido en el caso del ciclo diario nublado.

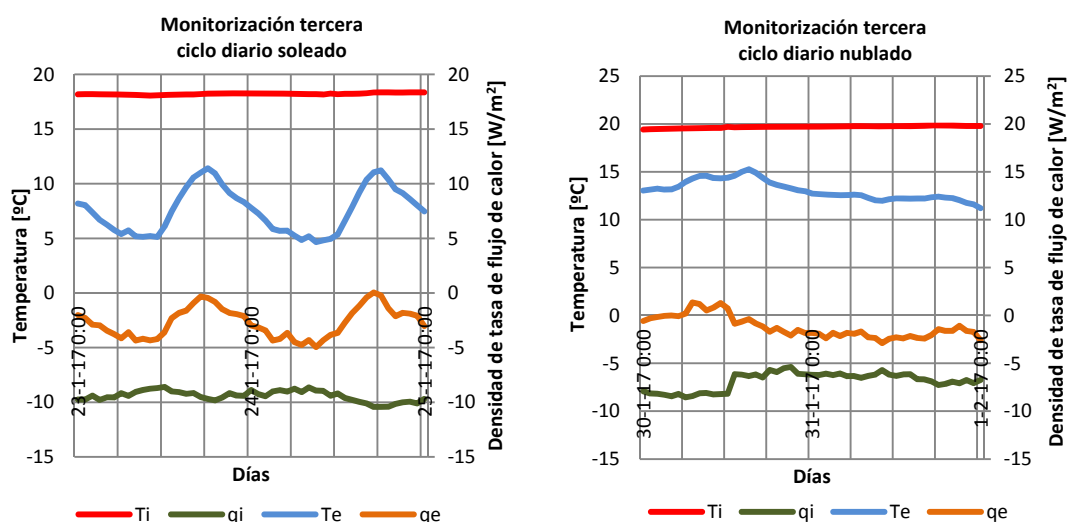


Figura IV.66: Comportamiento de densidad de tasa de flujo de calor y temperatura exterior e interior en un día soleado (izquierda) y un día nublado (derecha) de la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

Para analizar la relación lineal que pudiera existir entre dos variables cuantitativas, se han utilizado las correlaciones de Pearson. Un valor obtenido de 1 muestra una relación lineal

perfecta positiva entre dos variables. El valor -1 muestra una relación lineal perfecta negativa. El 0 indica que no existe ninguna relación. Es importante advertir que este coeficiente de correlación no implica causalidad, ya que dos variables pudieran estar linealmente relacionadas sin ser la causa una de la otra.

En la tabla IV.15, extraída del software de tratamiento estadístico SPSS, se exponen los coeficientes de correlaciones de Pearson obtenidos entre las variables t_e , t_i , q_e , q_i , q_l , ΔT y HR de los resultados de la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito.

En este caso las correlaciones mostraron que existe una relación positiva y muy alta entre la temperatura exterior y la densidad de tasa de flujo exterior. Esto ya se había observado de forma gráfica en la anterior figura estando en fase las dos curvas. También se han encontrado correlaciones positivas pero de menor valor entre la densidad de tasa de flujo de calor interior con la temperatura interior y la densidad de tasa de flujo de calor exterior con la temperatura interior.

Se han encontrado dos correlaciones negativas pero poseen un valor bastante bajo y que han sido la densidad de tasa de flujo de calor interior con la temperatura exterior y con la densidad de tasa de flujo de calor exterior.

En concreto, si se consideran las densidades de flujo de calor, en el caso del parámetro de flujo de calor latente q_l , resta de ($q_i - q_e$), la correlación con la humedad relativa interior es significativa con un valor de $r_{q_l, HRi} = 0,493$, $p < 0,001$. En contraste la correlación entre el flujo de calor latente y la diferencia de temperaturas es muy baja y no significativa con un valor $r_{q_l, \Delta T} = 0,058$

Con respecto a la densidad de tasa de flujo de calor interior q_i , es la temperatura interior la que posee una correlación más fuerte y significativa de valor $r_{q_i, T_i} = 0,910$, $p < 0,001$. Por el contrario, la correlación del valor de flujo de calor interior es mínimo con la humedad ambiental exterior.

		$q_l(\text{average})$	$q_e(\text{average})$	$q_i(\text{average})$	$T_i(\text{average})$	$T_e(\text{average})$	$\Delta T(\text{average})$	$HR_{li}(\text{average})$	Humedad (%)
$q_l(\text{average})$	Pearson Correlation	1	,275**	,817**	,910**	,613**	-,480**	,827**	,027
	Sig. (2-tailed)		,000	,000	,000	,000	,000	,000	,702
	N	351	346	346	351	351	351	321	197
$q_e(\text{average})$	Pearson Correlation	,275**	1	-,327**	,523**	,857**	-,892**	,480**	-,157*
	Sig. (2-tailed)	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,029
	N	346	346	346	346	346	346	316	192
$q_i(\text{average})$	Pearson Correlation	,817**	-,327**	1	,591**	,094	,058	,493**	,137
	Sig. (2-tailed)	,000	,000		,000	,082	,278	,000	,059
	N	346	346	346	346	346	346	316	192
$T_i(\text{average})$	Pearson Correlation	,910**	,523**	0,5906**	1	,801**	-,682**	,910**	,190**
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000		,000	,000	,000	,007
	N	351	346	346	351	351	351	321	197
$T_e(\text{average})$	Pearson Correlation	,613**	,857**	,094	,801**	1	-,984**	,726**	,003
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,082	,000		,000	,000	,970
	N	351	346	346	351	351	351	321	197
$\Delta T(\text{average})$	Pearson Correlation	-,480**	-,892**	,058	-,682**	-,984**	1	-,616**	,046
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,278	,000	,000		,000	,517
	N	351	346	346	351	351	351	321	197
$HR_{li}(\text{average})$	Pearson Correlation	,827**	,480**	0,4927**	,910**	,726**	-,616**	1	,316**
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,000		,000
	N	321	316	316	321	321	321	324	170
Humedad (%)	Pearson Correlation	,027	-,157*	,137	,190**	,003	,046	,316**	1
	Sig. (2-tailed)	,702	,029	,059	,007	,970	,517	,000	
	N	197	192	192	197	197	197	170	229

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tabla IV.15: Coeficientes de correlación de Pearson de las diferentes variables analizadas. Salida SPSS statistics

El parámetro de la densidad de tasa de flujo de calor exterior q_e , correlaciona en mayor grado con la diferencia de temperaturas DT de forma significativa y con un valor de $r_{q_i,DT} = 0,892$, $p < 0,001$ y con la temperatura exterior T_e también de forma significativa con un valor de $r_{q_i,T_e} = 0,857$, $p < 0,001$. Es con la humedad ambiental exterior la que menor correlación posee.

La densidad de tasa de flujo de calor y la humedad ambiental

Los datos estadísticos de humedad relativa obtenidos de los valores horarios recogidos se muestran en la tabla IV.16 a continuación. El valor medio de la humedad relativa interior ha sido del 59,5% y de 88,9% en el caso de la humedad relativa exterior.

Humedad relativa exterior H_{re} [%]										
Nc=95% ($\alpha=0,05$) N=324										
Media (St e)	Md	S^2	Std	Max	Min	Rango	Rango intercuartil	Q1 (P_{25})	Q2 (P_{50})	Q3 (P_{75})
88,9 (0,6)	93,2	154,4	12,4	100	34	65,57	15,04	84,6	93,2	99,6
Humedad relativa interior H_{ri} [%]										
Nc=95% ($\alpha=0,05$) N=324										
Media (St e)	Md	S^2	Std	Max	Min	Rango	Rango intercuartil	Q1 (P_{25})	Q2 (P_{50})	Q3 (P_{75})
59,5 (0,2)	59,5	23,2	4,81	66,8	51,8	15,04	9,1	55,1	59,5	64,2

Media; (St e): error estándar; Md: mediana; S^2 : varianza; Std: desviación estándar; Max: máximo; Min: mínimo; Q1: cuartil 1; Q2: cuartil 2; Q3: cuartil 3; Nc: nivel de confianza; α : nivel de significación; N número de datos válidos de la prueba

Tabla IV.16: Valores descriptivos de la humedad relativa interior y exterior de la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

Los rangos de variación entre cuartiles han oscilado entre 84,6 y 99,6% en el caso de la humedad relativa exterior. En el caso de la humedad relativa interior han oscilado entre 55,1 y 64,2%.

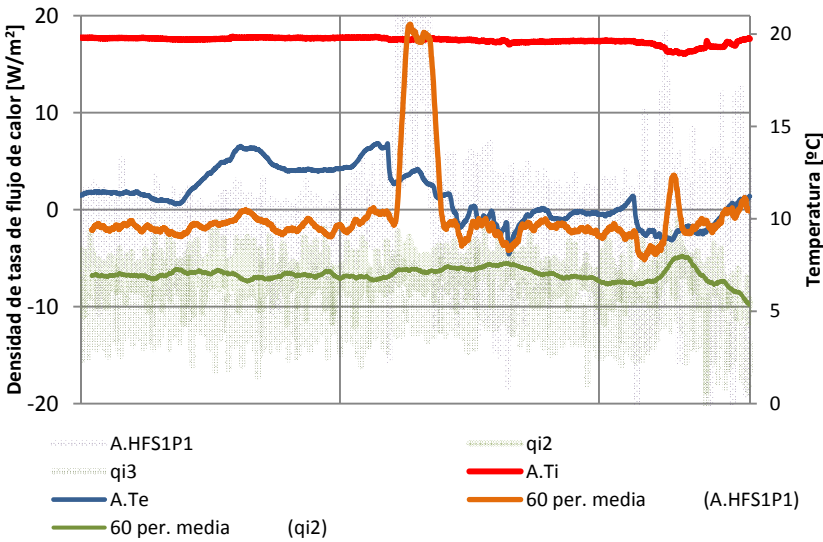


Figura IV.67: Mojado del sensor q1 exterior (línea naranja) en la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

Se ha considerado relevante representar el evento sucedido en el registro de datos el día 31 de enero del 2017 de 13.00 a 16.00 horas momento en el que llovió. Puede observarse el valor de densidad de tasa de flujo de calor exterior (naranja), donde de forma precipitada se eleva el valor y en breve cesa. Este comportamiento ha sido debido al mojado del sensor provocando

una recogida de datos anormales. En el momento que el agua se ha evaporado se ha continuado con la medida.

Rogass (2000) indicaba que la densidad de tasa de flujo de calor exterior se correspondía con el calor por conducción, que según la ley de Fourier, sigue la ley de la diferencia de temperaturas. En el caso de la densidad de tasa de flujo de calor medido por el interior es el total, estando incorporado el calor debido a cambios de estado del agua, denominado calor latente.

Siguiendo este argumento, la figura IV.68 trata de mostrar la posible correlación de comportamiento entre la densidad de tasa de flujo interior, con la diferencia de temperaturas y con la humedad relativa interior. Se han organizado los datos en función de la diferencia de temperaturas recogidas, indicada en la línea roja inferior. La línea azul muestra las diferentes humedades relativas que ha tenido y el color verde muestra los valores de densidad de tasa de flujo de calor. Es, como consecuencia que la figura muestra una línea creciente el incremento de temperatura con sus correspondientes pares de valores de densidad de tasa de flujo de calor interior y de humedad relativa interior.

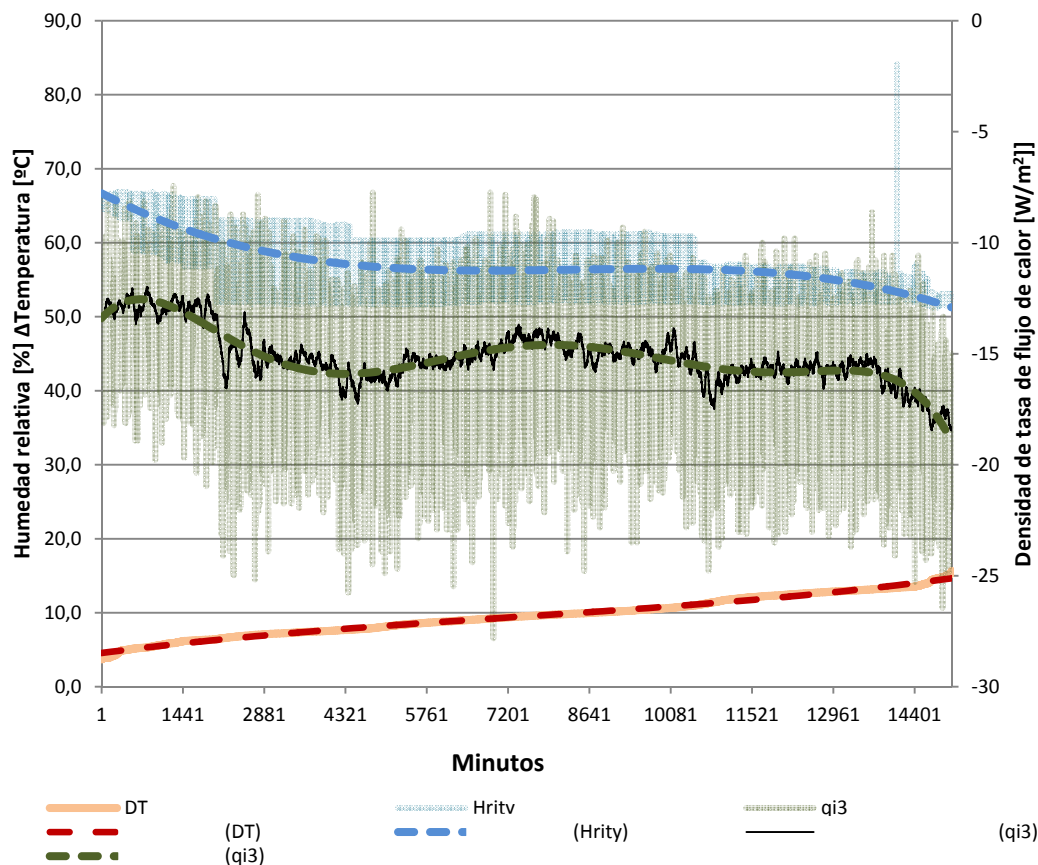


Figura IV.68: Datos de humedad relativa, diferencia de temperatura y densidad de tasa de flujo de calor en la monitorización tercera 19 de enero al 3 de febrero del 2017

Sin embargo, aunque los coeficientes de correlación de Pearson demostraron relaciones con la humedad relativa, no se puede apreciar claramente la relación en la figura. Para poder hallar una explicación del comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor se ha recurrido a la estadística. En este caso además de utilizar las correlaciones de Pearson, ya vistas, se

procede a un análisis de regresión lineal, buscando no sólo una explicación sino una proporción en una posible predicción que pudiese realizar la humedad relativa como variable independiente.

Para el tratamiento de datos, éstos se han organizado en tres formas diferentes. En el primer caso, utilizando los datos de los periodos de lluvia, en el segundo caso utilizando los periodos secos, sin lluvia y un tercer caso de la totalidad de datos obtenidos del periodo de monitorización tercera entre el 19 de enero hasta el 6 de febrero del 2017.

Análisis de periodos de lluvia de la monitorización tercera

Realizando las correlaciones de Pearson para la densidad de tasa de flujo de calor exterior q_e en el periodo analizado **con lluvia** se ha encontrado que tiene una correlación de dos colas (NC=99%) con la diferencia entre la temperatura interior y la exterior ΔT de 0,67 y también con la temperatura exterior T_e de 0,65.

En el caso de la densidad de tasa de flujo de calor interior q_i , la mayor correlación de Pearson encontrada de dos colas (NC=99%) es con la temperatura interior T_i y de valor 0,426 y con una cola con la humedad relativa interior H_{ri} de valor 0,293.

Con los datos del ensayo de monitorización tercera, también se ha realizado un análisis de regresión lineal. Se puede observar en la tabla siguiente las ecuaciones de regresión lineal estandarizadas obtenidas, una vez introducidas las variables de T_i , T_e , ΔT , H_{re} , H_{ri} , presión atmosférica y precipitaciones para determinar cuáles son las variables por las que son explicadas la densidad de tasa de flujo calor interior (q_i) y exterior (q_e).

Se observa que en el caso de la q_i , es con la temperatura interior, la variable que más puede explicarla. En el caso de introducir una segunda variable, es con la humedad relativa exterior y la tercera la diferencia de temperaturas. En el caso de q_e , es exclusivamente la diferencia de temperaturas la que explica el comportamiento del q_e .

Se realizó también la prueba de Durbin Watson para detectar la presencia de la autocorrelación en los residuos, obteniéndose unos valores de 1,968 y 1,874. Estos valores significan que casi no existe autocorrelación, ya que el valor se aproxima a dos. Para detectar también la correlación entre predictores en el análisis de regresión, se realizó la prueba del factor de inflación de la varianza denominado VIF, que describe la multicolinealidad. El valor obtenido fue de 1, indicando que no están correlacionados. Los resultados de estas pruebas indicaron que las ecuaciones de regresión lineal encontradas son bastante fiables.

q_i Fiabilidad: Durbin Watson 1,968 y VIF 1,00	q_e Fiabilidad: Durbin Watson 1,874 y VIF 1,00
$q_i = 0,377T_i$	$q_e = -0,72\Delta T$
$q_i = 0,462T_i - 0,427H_{re}$	-
$q_i = 0,572T_i - 0,397H_{re} + 0,27\Delta T$	-

Tabla IV.17: Ecuaciones de regresión lineal estandarizadas de las variables dependientes q_e y q_i de la monitorización tercera del 19 de enero al 6 de febrero del 2017 en periodo de lluvia

Análisis de periodos sin lluvia de la monitorización tercera

Al analizar el periodo de monitorización tercera **sin lluvia**, se observa el q_e tiene una correlación alta de dos colas con la diferencia de temperatura ΔT de valor 0,67 y también con la temperatura exterior T_e de valor 0,579.

En el caso de la densidad de tasa de flujo de calor interior q_i las correlaciones de dos colas (NC=99%) son con la temperatura interior T_i de valor 0,693, la humedad relativa exterior H_{re} de valor 0,645 y con la humedad relativa interior H_{ri} de valor 0,50

En el caso del análisis de regresión lineal en el ensayo de monitorización tercera y suponiendo el periodo sin lluvia, se han obtenido las ecuaciones de regresión lineal estandarizadas e indicadas en la tabla. En cuanto al q_i , es la temperatura interior la primera variable en explicar su comportamiento. La segunda variable es la temperatura exterior. La tercera variable es la humedad relativa exterior.

En el caso de la q_e , se ha obtenido la diferencia de temperaturas como primera variable, y no ha diferido con el periodo de lluvia. Sin embargo, existe una segunda variable en la ecuación que es la humedad relativa exterior. La tercera variable es la presión atmosférica y la última la humedad ambiental.

q_i Fiabilidad: Durbin Watson 0,402 y VIF 1,00	q_e Fiabilidad: Durbin Watson 0,053 y VIF 1,00
$q_i = 0,584T_i$	$q_e = -0,819\Delta T$
$q_i = 0,747T_i - 0,332T_e$	$q_e = -0,761\Delta T - 0,362H_{re}$
$q_i = 0,829T_i - 0,306T_e - 0,281H_{re}$	$q_e = -0,76\Delta T - 0,539H_{re} - 0,242P$
-	$q_e = -0,95\Delta T - 0,416H_{re} - 0,491P - 0,435H_{ri}$

Tabla IV.18: Ecuaciones de regresión lineal estandarizadas de las variables dependientes q_e y q_i de la monitorización tercera del 19 de enero al 6 de febrero del 2017 en periodo sin lluvia

Análisis del periodo total de monitorización tercera

En la tabla abajo expuesta, se expresan las ecuaciones obtenidas del análisis de regresión lineal en la totalidad del periodo ensayado de la monitorización tercera.

En el caso de la q_i es la temperatura interior la variable única que se introduce en la ecuación para explicar la densidad de tasa de flujo de calor interior.

En cuanto al q_e es la diferencia de temperaturas la primera variable que puede explicar. La segunda variable ha sido la humedad relativa exterior. La tercera han sido las precipitaciones.

Es de destacar, no sólo en este análisis del periodo total sino en el del periodo sin lluvia, que la prueba de autocorrelación de la muestra de los residuos, prueba de Durbin Watson está cercana a 0,5 indicando una autocorrelación, siendo ahora menos fiable las ecuaciones de regresión lineales obtenidas en comparación con el caso del periodo con lluvia.

q_i Fiabilidad: Durbin Watson 0,62 y VIF 1,00	q_e Fiabilidad: Durbin Watson 0,11 y VIF 1,00
$q_i = 0,866T_i$	$q_e = -0,813\Delta T$
—	$q_e = -0,773\Delta T - 0,299HRe$
—	$q_e = -0,712\Delta T - 0,326HRe - 0,293Pre$

Tabla IV.19: Ecuaciones de regresión lineal estandarizadas de las variables dependientes q_e y q_i de la monitorización tercera del 19 de enero al 6 de febrero del 2017 en la totalidad del periodo

Siendo:

ΔT	[°C]	Diferencia de temperaturas
HR_i	[%]	Humedad relativa interior
HR_e	[%]	Humedad relativa exterior
T_e	[°C]	Temperatura exterior
T_i	[°C]	Temperatura interior
q_e	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor exterior
q_i	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor interior
P	[Pa]	Presión atmosférica?
Pre	[mm]	Precipitaciones

Se puede resumir que los valores de la **densidad de tasa de flujo de calor interior** han obtenido una media de toda la monitorización de $-8,74\text{W/m}^2$, con un máximo valor de $-5,37\text{W/m}^2$ y un mínimo de $-12,76\text{W/m}^2$, es decir, siempre de valor negativo significando que el movimiento del flujo es sentido de pérdida, desde el interior y hacia la parte exterior del cerramiento. El ciclo de su comportamiento diario ha ido en contrafase con la de la temperatura exterior. En relación a los coeficientes de correlación de Pearson encontrados, la correlación más fuerte y significativa fue con la temperatura interior $r=0,91$.

En el caso de la **densidad de tasa de flujo de calor exterior** se ha obtenido una media de toda la monitorización de $-1,84\text{W/m}^2$, con un máximo valor de $1,35\text{W/m}^2$ y un mínimo de $-4,94\text{W/m}^2$. En este caso se han llegado a valores positivos, alternado el sentido de flujo, es decir, que el movimiento del flujo positivo es sentido de ganancia, desde el exterior y hacia el interior. En el análisis del flujo diario, se encontró que su valor en algunos momentos fue 0. Se observó un patrón temporal del cerramiento en ese periodo monitorizado estaba en fase con el comportamiento de la temperatura exterior. Al analizar los coeficientes de correlación de Pearson, la correlación más fuerte y significativa fue detectada con la diferencia de temperaturas con un valor de $r=-0,892$

Restando los valores de q_i y q_e se obtuvo el parámetro q_l . Este parámetro fue incorporado en el análisis de correlaciones de Pearson. Se encontró que la temperatura interior junto a la humedad relativa interior fueron las variables que más correlacionan con ella y de forma significativa. En concreto con la humedad relativa interior se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de $r=0,4927$

Se aplicó el procedimiento de análisis de regresión lineal para averiguar en qué proporción eran explicables los parámetros medidos. Se organizaron los datos recogidos para realizar tres tipos de análisis: periodo de lluvia, periodo sin lluvia y periodo total.

Las ecuaciones de regresión obtenidas para explicar el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor tanto interior como exterior indicaron como una variable de segundo orden (en periodo de lluvia y en la totalidad del periodo) la humedad relativa exterior e interior. Incluso se obtuvo como tercera variable independiente explicativa la precipitación. Las ecuaciones de regresión lineal del periodo de lluvia son las que han mostrado mayor fiabilidad.

IV.4 TRANSMITANCIA TÉRMICA

El último apartado de este capítulo IV tiene como objetivo la obtención del valor U o transmitancia térmica a partir de los valores recogidos en la campaña de monitorización tercera. Los valores recogidos por los sensores de densidad de tasa de flujo de calor de la monitorización segunda fueron descartados por la existencia de una variación de signo y magnitud. Una vez con datos veraces, y tal y como se explicó detalladamente en el capítulo anterior de método, se siguió el procedimiento definido en la norma ISO 9869:2014.

En el caso de este procedimiento, todos los valores necesarios para el cálculo del valor U se determinan directamente con medidas in situ y aplicando la fórmula siguiente recogida en la ISO 9869:2014:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})}$$

Dónde:

U	[W/m ² K]	Transmitancia térmica
q	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor
T_i	[°C]	Temperatura interior
T_e	[°C]	Temperatura exterior

La duración total de la prueba fue desde el día 19 de enero hasta el 6 de febrero del 2017. La dinámica del proceso dividió esta monitorización en dos periodos diferenciados. El primero desde el día 19 de enero hasta el 30 de enero del 2017, donde no se producen precipitaciones y las temperaturas exteriores registradas fueron bastante bajas. A partir de esa fecha, existieron precipitaciones y la temperatura exterior media se incrementó. La monitorización finalizó el 7 de febrero del 2017, con una prueba control y verificación de los sensores de densidad de tasa de flujo de calor.

La figura IV.69 muestra la posición de los dos sensores de flujo de calor (colocados en la superficie interior del cerramiento y en la posición intermedia elegida tras haber sido analizadas las temperaturas superficiales). Ver apartado III de este capítulo.

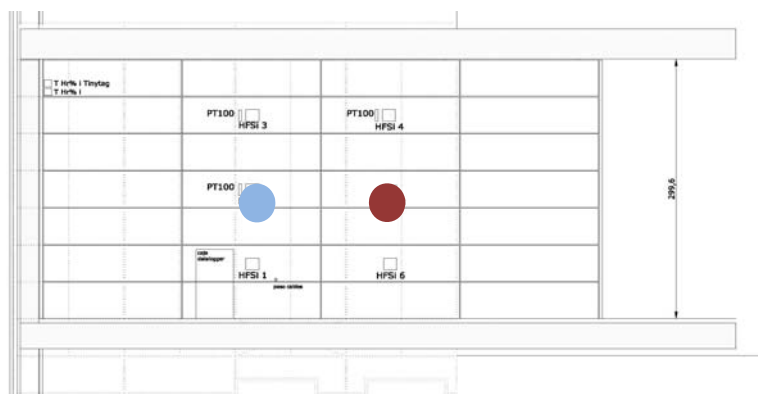


Figura IV.69: Alzado de posición de los sensores para la obtención de la transmitancia térmica, valor-U. Posiciones de los sensores (19 de enero al 7 de febrero del 2017)

Con los datos recogidos y siguiendo el procedimiento establecido del método de la media, se realizó una búsqueda en el proceso completo de monitorización para que se cumpliesen las condiciones exigidas por la norma (algunas advertidas ya en el capítulo de método). El valor de U supone la obtención de un número con mediciones de temperatura exterior e interior en estado estacionario, es decir, sin variaciones. Sin embargo, es muy difícil alcanzar las condiciones estacionarias en monitorizaciones in situ de la realidad.

Se seleccionaron las temperaturas ambientales interiores y exteriores para el cálculo. Se entiende que se han minimizado las incertidumbres, ya que en el caso de la temperatura exterior como es fachada norte no estaba sometido a radiación solar directa y las variaciones no eran tan exageradas como en otras orientaciones. En el caso de la temperatura interior al haber analizado previamente un estudio de la estratificación de temperaturas de la sala y haber colocado el sensor en una posición representativa en la sala, se decide considerar estas temperaturas.

Efecto del almacenamiento térmico. Cálculo de los factores de corrección de masa térmica

Además de considerar que la monitorización deberá ser llevada a cabo durante un periodo múltiplo de 24h, la norma advierte de la necesidad de incorporar unos factores de corrección por masa si el cerramiento posee una alta masa térmica.

El tipo de fachada ventilada de granito analizada en este estudio posee una hoja interior de hormigón armado pesada de 24cm de espesor. Debido fundamentalmente a esta capa, el cerramiento posee un calor específico por unidad de área de más de 20 kJ/m²K. Es por ello, que se siguió el procedimiento de elaboración de los factores de corrección por masa térmica indicado en el apartado 7.2.2 de la ISO 9869:2014. Puede observarse en la siguiente tabla los valores de las variables que fueron incorporados para el cálculo de la corrección.

Material	Posición capa	Calor específico	densidad	espesor	Capacidad térmica	Conductividad térmica
		[kJ/kgK]	[kg/m ³]	[m]	[J/m ² K]	[W/mK]
granito	1	1000	2600	0,03	78000	2,8
mortero	2	1000	1000	0,01	10000	0,7
hormigón	3	1000	2400	0,25	600000	1,6
aislamiento	4	1800	1200	0,03	64800	0,025

Tabla IV.20: Propiedades de cada capa de material componente de la fachada para el cálculo de corrección por masa

Una vez obtenidos estos valores, se definieron los cinco planos paralelos y las cuatro capas de las que se compone el cerramiento.

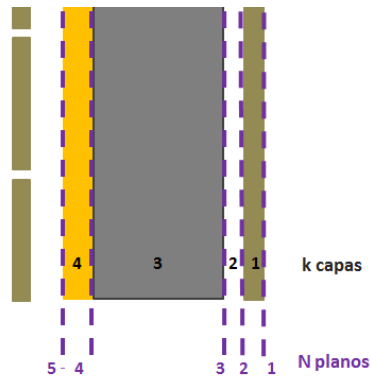


Figura IV.70: Definición de planos y capas del cerramiento analizado según procedimiento ISO 9869:2014

Para cada capa se calculó la interior R_{ik} y la exterior R_{ek} con los datos de la tabla.

$$R_{ik} = \sum_{j=1}^{k-1} R_j \quad R_{ek} = \sum_{j=k+1}^N R_j$$

Y se calcularon los valores siguientes:

$$F_{ik} = C_k \left[\frac{R_{ek}}{R} + \frac{R_k^2}{3R^2} - \frac{R_{ik} R_{ek}}{R^2} \right] \quad F_i = \sum_{k=1}^N F_{ik}$$

$$F_{ek} = C_k \left[\frac{R_k}{R} \left\{ \frac{1}{6} + \frac{R_{ik} + R_{ek}}{3R} \right\} + \frac{R_{ik} R_{ek}}{R^2} \right] \quad F_e = \sum_{k=1}^N F_{ek}$$

Dónde:

F_i	[J/m ² K]	Factor de corrección de masa térmica interior
F_e	[J/m ² K]	Factor de corrección de masa térmica exterior
C	[J/m ² K]	Capacidad térmica de la capa
R	[m ² K/W]	Resistencia térmica
N	[-]	Número de plano
k	[-]	Número de capa

Realizado los cálculos, se obtuvieron los siguientes factores de corrección térmica para este cerramiento. La tabla IV.21 indica los valores obtenidos.

Fi	Fe
624053,97	130691,8

Tabla IV.21: Factores de masa térmica obtenidos según apartado 7.2.2 de la ISO 9869:2014

Valor de U corregido

Una vez realizados los cálculos de los factores de corrección se incorporaron en la fórmula para la obtención del valor modificado de densidad de tasa de flujo de calor, y consecuentemente para la elaboración del valor U corregido. Puede verse en la tabla IV.22 los parámetros y fórmulas que han sido utilizadas en la elaboración de este valor.

Día	$\sum T_i$	$\sum T_e$	$\sum q$	$\sum q'$	U	U'
	[°C]	[°C]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
1	T_{i1}	T_{e1}	q_1			
2	$T_{i1} + T_{i2}$	$T_{e1} + T_{e2}$	$q_1 + q_2$			
3	$T_{i1} + \dots T_{i3}$	$T_{e1} + \dots T_{e3}$	$q_1 + \dots q_3$			
4	$T_{i1} + \dots T_{i4}$	$T_{e1} + \dots T_{e4}$	$q_1 + \dots q_4$			
5	$T_{i1} + \dots T_{i5}$	$T_{e1} + \dots T_{e5}$	$q_1 + \dots q_5$			
6	$T_{i1} + \dots T_{i6}$	$T_{e1} + \dots T_{e6}$	$q_1 + \dots q_6$			
7	$T_{i1} + \dots T_{i7}$	$T_{e1} + \dots T_{e7}$	$q_1 + \dots q_7$			
8	$T_{i1} + \dots T_{i8}$	$T_{e1} + \dots T_{e8}$	$q_1 + \dots q_8$			
9	$T_{i1} + \dots T_{i9}$	$T_{e1} + \dots T_{e9}$	$q_1 + \dots q_9$			
10	$T_{i1} + \dots T_{i10}$	$T_{e1} + \dots T_{e10}$	$q_1 + \dots q_{10}$	$\frac{\sum q - (F_i \delta T_i + F_e \delta T_e)}{\Delta T}$	$\frac{\sum q}{(\sum T_i - \sum T_e)}$	$\frac{\sum q'}{(\sum T_i - \sum T_e)}$

Tabla IV.22: Procedimiento para el cálculo de los valores U corregidos (U') según ISO 9869:2014

Donde:

$\sum T_i$	[°C]	Sumatorio de las medidas de temperatura interior
$\sum T_e$	[°C]	Sumatorio de las medidas de temperatura exterior
δT_i	[°C]	Diferencia entre la temperatura interior durante las 24 h del periodo de análisis y las primeras 24h de análisis
δT_e	[°C]	Diferencia entre la temperatura exterior durante las 24 h del periodo de análisis y las primeras 24h de análisis
$\sum q$	[W/m ²]	Sumatorio de densidad de tasa de flujo de calor
$\sum q'$	[W/m ²]	Sumatorio de densidad de tasa de flujo de calor corregido
F_i	[J/m ² K]	Factor de corrección de masa térmica interior
F_e	[J/m ² K]	Factor de corrección de masa térmica exterior
U	[W/m ² K]	Transmitancia térmica
U'	[W/m ² K]	Transmitancia térmica corregida
ΔT	[s]	Intervalo de medidas en segundos

En particular, también se tuvieron que cumplir también estas tres condiciones:

. Condición primera

La primera condición suponía que la duración del test deberá exceder de 72h si la temperatura del sensor de flujo es estable alrededor de él, de otra forma deberá ser más larga. En el caso de cerramientos con grandes capacidades térmicas deberá ser un periodo de al menos 96h y deberán ser utilizados en el análisis los factores de masa térmica.

En el caso que se aplica, la primera condición fue satisfecha. La duración del test excedió de 96h o cuatro días. En concreto la toma de datos de la que se ha extraído el valor U ha sido del 20 de enero del 2017 a las 23.00h hasta el 30 de enero a las 23.00h, un total de diez días, múltiplo de 24h.

. Condición segunda

Esta segunda condición establece que el valor R obtenido al final del test no se desviase más de +-5% del valor obtenido 24h antes.

El cerramiento de fachada ventilada de granito tuvo

. El valor U obtenido al final del periodo ha sido de $U = 0,724 \text{ W/m}^2\text{K}$

. El valor U obtenido 24 horas antes del final del periodo $U = 0,731 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$R = \frac{1}{U} - R_{si} - R_{se} \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

Dónde:

$R_{si} = 0,13$ Resistencia térmica superficial interior

$R_{se} = 0,04$ Resistencia térmica superficial exterior

Valor de R obtenido al final del periodo, cuando el valor U es $0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$R_{final} = \frac{1}{0,724} - 0,13 - 0,04 = 1,211 \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

Valor de R obtenido 24 horas antes del final del periodo U es $0,67 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$R_{24 \text{ h antes}} = \frac{1}{0,731} - 0,13 - 0,04 = 1,197 \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

Existe un 1,16% de diferencia, lo que significa que esta condición también se ha satisfecho.

. Condición tercera

Finalmente la tercera condición indicaba que el valor R obtenido analizando los datos desde el primer periodo durante $INT(2 \cdot D_T/3)$ de días no se desviase más del +-5% de los valores obtenidos de los datos de último periodo de la misma duración. D_T es la duración del test en días, INT es la parte entera.

La duración del test elegido fue de cuatro días.

$$INT\left(2 \cdot \frac{D_T}{3}\right) = INT\left(2 \cdot \frac{10}{3}\right) = INT(6,66) = 6$$

De tal forma que el valor obtenido de R de los primeros seis días no difiera e +-5% de los valores obtenidos en los últimos seis días.

. Valor de U obtenido al final de los seis días primeros: $U = 0,753 \text{ W/m}^2\text{K}$

. Valor de U obtenido al final de los seis días últimos: $U = 0,724 \text{ W/m}^2\text{K}$

Valor de R obtenido al final del periodo, cuando el valor U es $0,753 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$R_{\text{primeros 6 días}} = \frac{1}{0,753} - 0,13 - 0,04 = 1,158$$

Valor de R obtenido al final del periodo, cuando el valor U es $0,731 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$R_{\text{finales 6 días}} = \frac{1}{0,724} - 0,13 - 0,04 = 1,211$$

Existe un 4,6% de diferencia, lo que significa que esta condición también se ha satisfecho.

Todas las condiciones se han satisfecho por lo que se puede considerar este valor de transmitancia térmica U2 válido.

La figura siguiente, muestra la gráfica obtenida del valor U2. Se extrajo el valor de U del sensor 2 y también del sensor 3. Los valores de transmitancia térmica U obtenidos con los datos del sensor 2 han cumplido las condiciones expresadas anteriormente y exigidas por la norma. Como se indicó anteriormente, el valor de U del sensor 2 obtuvo $0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$. El valor de U del sensor 3 reflejó una medida de $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Estos valores de transmitancia térmica obtenidos son también mostrados gráficamente en la tabla IV.22.

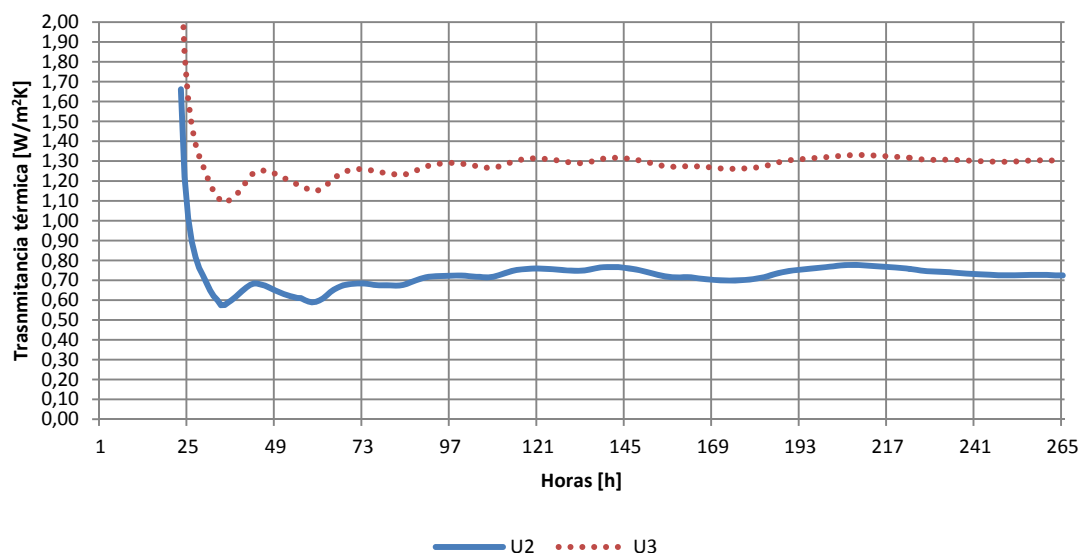


Figura IV.71: Curva de transmitancia térmica en la columna izquierda (azul) y derecha (rojo) con corrección de masa según procedimiento del método de la media ISO 9869:2014



Posición	Valor U [W/m ² K]	Δ posición 2 [%]
2 	0,73	0
3 	1,30	178

Tabla IV.23: Transmitancias térmicas obtenidas de la monitorización del cerramiento

La tabla también muestra las diferencias existentes entre los valores U extraídos. La última columna expone cual ha sido esa diferencia porcentual entre la posición segunda y la tercera. Estas diferencias han sido máximas en un 78%.

Es de señalar que ha sido muy complejo seguir el procedimiento establecido y cumplir y buscar en los datos recogidos las condiciones indicadas en la norma ISO 9869:2014, sobre todo en climas con saltos térmicos reducidos, a pesar de haber elegido los meses con mayor frío.

Existen muchas condiciones que debe cumplir la monitorización, ya que se trata, como dice claramente la norma, de asumir unos valores medios de densidad de tasa de flujo de calor sobre un periodo de tiempo suficientemente extenso que diese una buena estimación del estado estacionario.

Puede verse en la siguiente figura la posición de los dos sensores en la monitorización tercera realizada.

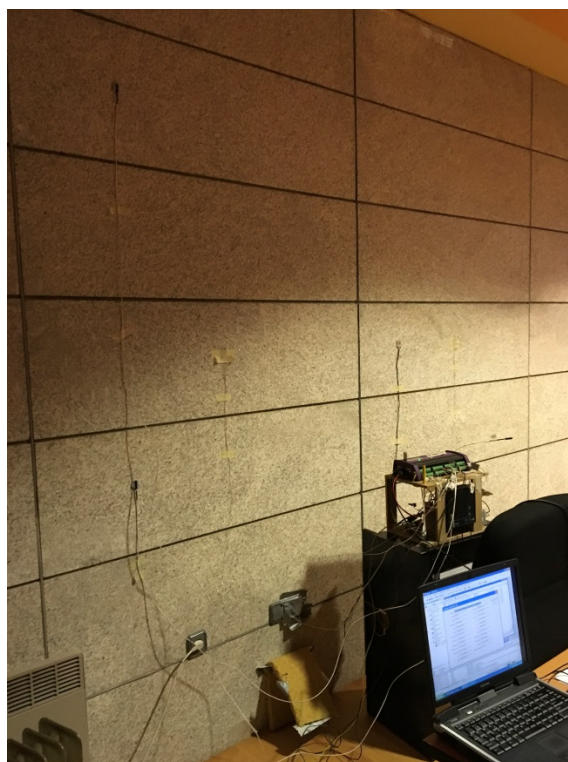


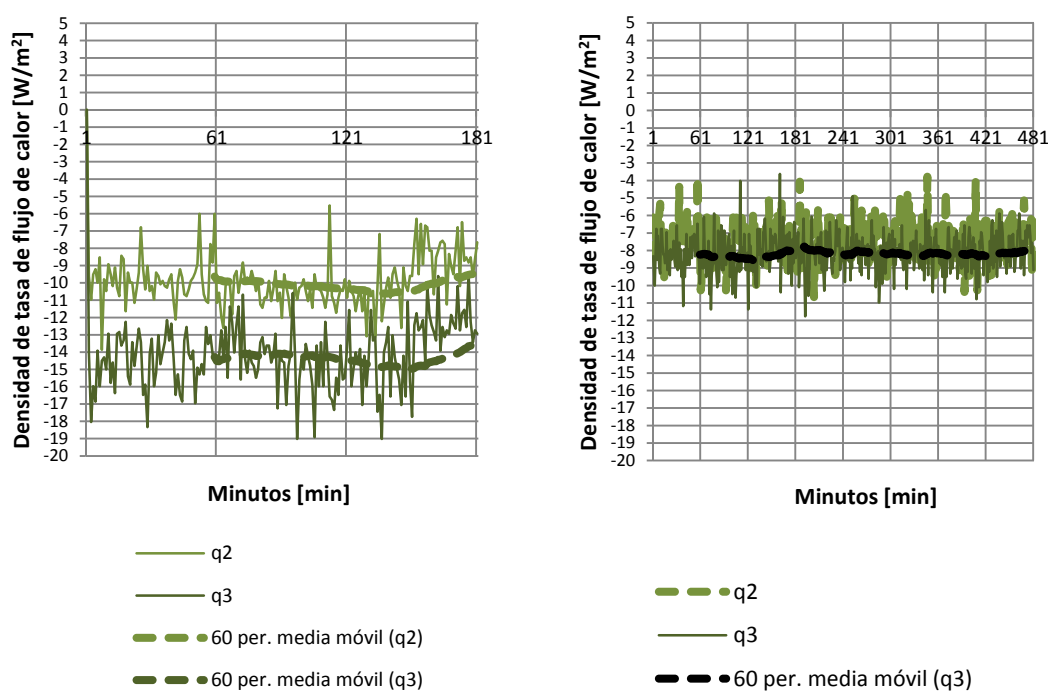
Figura IV.72: Posición de los dos sensores de temperatura superficial (PT-100) y los dos sensores de densidad de tasa de flujo de calor (HFS2 y HFS3) en la prueba realizada en enero y febrero del 2017

Comprobación de la medida de los sensores

El primer día se realizaron pruebas de calibración y pretest, comprobando que los sensores medían igual y que no había diferencia de medidas entre ellos. Para la colocación de los sensores de temperatura superficial tipo PT-100 se utilizó la goma tipo blue-tack pues se comprobó que los resultados entre sensores no diferían, no así cuando se dispuso cinta adhesiva a doble cara. Los sensores se colocaron en una misma posición para registrar los datos y comprobar las mediciones.

Una vez realizada esta prueba, los sensores se dispusieron en las posiciones elegidas para realizar la toma de datos correspondientes. Puede verse en la foto anterior como se colocaron los sensores.

Finalmente para comprobar esta gran desviación obtenida en la transmitancia térmica de los dos sensores de tasa de flujo de calor, el día 6 de febrero del 2017 a las 23.23 horas se intercambiaron las posiciones de los sensores. El sensor en posición 2 pasó a tener la posición 3 y viceversa. Puede observarse en las figuras siguientes como ha sido este proceso. Se ha detectado que las medias de densidad de tasa de flujo de calor al proceder al intercambio de los sensores prácticamente no difieren.



	Media qi2 [W/m ²]	Media qi3 [W/m ²]
Test	-8,2	-12,2
Post test comprobación	-7,8	-7,9

Figura IV.73: Valores horarios de densidad de tasa de flujo de calor [W/m²] durante la monitorización y el periodo de test de comprobación

De esta comprobación se deduce que fue muy probable que estas diferencias hayan sido debidas al pegado diferente que se ha realizado. Esta situación podrá ser comprobada en las pruebas de verificación que se realizaron. Es por ello, que finalmente se decide descartar el

valor de $1,30 \text{ W/m}^2\text{K}$, quedando el **valor de transmitancia térmica del cerramiento de fachada ventilada de granito $0,73\text{W/m}^2\text{K}$.**

IV.5 SÍNTESIS CRÍTICA DEL CAPÍTULO IV

El objetivo del capítulo IV fue exponer los resultados de la monitorización del comportamiento higrotérmico del sistema constructivo de la fachada ventilada de granito con localización y orientación concreta.

En concreto, se ha considerado responder también a los objetivos específicos, de describir el clima de la localización de A Coruña y en relación con los valores normales. Se ha conocido y cuantificado, mediante monitorización, la exposición hídrica-ambiental y la densidad de tasa de flujo de calor de la fachada ventilada elegida. Finalmente se ha correlacionado la exposición hídrica-ambiental con el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor y el conocimiento de la transmitancia térmica.

Para ello el capítulo se organizó en cuatro partes: higrotermia, presión de vapor, densidad de tasa de flujo de calor y transmitancia térmica.

. En la parte de **higrotermia** se mostraron los resultados anuales y de tendencia diaria de los valores de temperatura y humedad relativa, tanto del exterior, de la cámara ventilada y del ambiente interior.

Se analizaron los datos anuales recogidos de temperatura. Como resultado se extrajo que la temperatura en la cámara había sido ligeramente superior a la del exterior pero con la misma tendencia de comportamiento. Además la temperatura de la cámara ha reflejado un amortiguamiento, sobre todo en los valores oscilatorios más bajos de temperatura exterior.

Con respecto a la humedad relativa ambiental exterior, se calculó que existieron 3845 horas en el año en las que había sido mayor del 79%. Los valores de humedad relativa en la cámara reflejan un amortiguamiento del comportamiento de la humedad relativa exterior. Con respecto a la cámara se ha hallado que la cámara posee diez meses en el año un valor de humedad absoluta más elevado que el ambiente exterior.

. En el **apartado de presión de vapor**, se extrajeron los valores medios de presión de vapor.. Con la diferencia de los valores, se analizaron los movimientos de difusión del vapor de agua a través del cerramiento que oscilaron entre -205Pa (Pve-Pvc) en el mes de noviembre 2008 y 95Pa (Pvc-Pvi) en el mes de agosto. Los resultados concluyeron que no hay una clara tendencia del movimiento de secado y mojado del cerramiento en épocas determinadas y que no queda clara la contribución de la cámara al secado del cerramiento. De hecho de las 7990 horas monitorizadas el potencial movimiento de difusión de vapor de agua hacia el interior ha sido de 44% frente al potencial de difusión hacia el exterior 55%. Se observó que al elevar la temperatura en el interior del salón de grados, se mejoraba el potencial de secado de cerramiento por el incremento de movimiento de difusión de vapor de agua hacia el exterior.

Se definieron comportamientos de los movimientos de difusión del vapor de agua que se relacionaban con las temperaturas, tanto entre el exterior y la cámara como entre el interior y la cámara.

. Los resultados de **las temperaturas superficiales** en la cara interior del cerramiento mostraron una variabilidad entre 17,40°C a 18,60°C. Se halló una estratificación vertical de

temperatura. Esto fue corroborado por dos instrumentaciones diferentes. Se detectó también una estratificación horizontal, de incremento del valor de temperatura a medida que el cerramiento se introduce en el edificio. Este análisis llevó a elegir la mejor posición que representaba el cerramiento para la recogida de valores de densidad de tasa de flujo de calor. Se halló experimentalmente el retardo térmico de la fachada ventilada obteniendo un tiempo de 4 horas y 23 minutos.

En cuanto a los valores recogidos de la **densidad de tasa de flujo de calor** interior se ha obtenido una media de toda la monitorización de $-8,74\text{W/m}^2$, con un máximo valor de $-5,37\text{W/m}^2$ y un mínimo de $-12,76\text{W/m}^2$, es decir, siempre de valor negativo significando que el movimiento del flujo es sentido de pérdida, desde el interior y hacia la parte exterior del cerramiento. El ciclo de su comportamiento diario va en contrafase con la de la temperatura exterior. En relación a la densidad de tasa de flujo de calor y los coeficientes de correlación de Pearson encontrados, la correlación más fuerte y significativa (2 colas) fue con la temperatura interior $r=0,91$.

En el caso de la densidad de tasa de flujo de calor exterior se ha obtenido una media de toda la monitorización de $-1,84\text{W/m}^2$, con un máximo valor de $1,35\text{W/m}^2$ y un mínimo de $-4,94\text{W/m}^2$. En este caso se han llegado a valores positivos, alternado el sentido de flujo, es decir, que el movimiento del flujo positivo es sentido de ganancia, desde el exterior y hacia el interior. En el análisis del flujo diario, se encontró que su valor en algunos momentos fue 0. Se observó un patrón temporal del cerramiento en ese periodo monitorizado estaba en fase con el comportamiento de la temperatura exterior. Al analizar las correlaciones de Pearson, la correlación más fuerte y significativa (2 colas) fue detectada con la diferencia de temperaturas con un valor de $r=-0,892$

Restando los valores de q_i y q_e se obtuvo el parámetro q_l . Este parámetro fue incorporado en el análisis de correlaciones de Pearson. Se encontró que la temperatura interior junto a la humedad relativa interior fueron las variables que más correlacionan con ella y de forma significativa. En concreto con la humedad relativa interior se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de $r=0,4927$

Se aplicó el procedimiento de análisis de regresión lineal para averiguar en qué proporción eran explicables los parámetros medidos. Las ecuaciones de regresión obtenidas para explicar el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor tanto interior como exterior indicaron como una variable de segundo orden (en periodo de lluvia y en la totalidad del periodo) la humedad relativa exterior e interior. Incluso se obtuvo como tercera variable independiente explicativa la precipitación.

. Para conocer y cuantificar el **valor de la transmitancia térmica** se siguió el procedimiento del método de la media de la normativa ISO 9869:2014. Debido al tipo de cerramiento analizado tuvieron que ser calculados los factores de masa térmica. Estos factores sirvieron para realizar una corrección del valor de densidad de tasa de flujo de calor y consecuentemente de transmitancia térmica. Se eligió un periodo de la monitorización tercera que cumplió las condiciones establecidas por la norma. Se representó la curva obteniendo finalmente $U=0,73\text{w/m}^2\text{K}$. Al haber monitorizado dos posiciones, y realizados los cálculos, se encontraron valores que difirieron en magnitud. El valor en la posición 3 fue de $1,30\text{W/m}^2\text{K}$ resultando ser una

diferencia de un 78% sobre el valor registrado inicial en la posición 2. Finalmente en la comprobación final de la medida de los sensores se dedujo que, durante el tiempo que duró la prueba, habían existido deficiencias de contacto en el sensor 3, concretamente entre la superficie del sensor y la superficie de la pared.

Tras estos resultados obtenidos de la experimentación, a continuación se procede a la exposición de los resultados de los análisis de sensibilidad de la simulación numérica realizados.

IV.5 CRITICAL SYNTHESIS OF CHAPTER IV

As an objective of chapter IV, in-situ monitoring results of the hygrothermal behavior of the open-joint ventilated granite façade with concrete location and orientation were presented

In particular, specific objectives have been considered to answer, to describe the climate of A Coruña location and in relation to normal values. Temperatures, moisture exposure and density of the heat flow rate of the ventilated façade have been known and quantified by means of monitoring. Finally moisture analysis was correlated with the behavior of heat flux density and thermal transmittance.

Due to this specific objectives, chapter IV was organized into four parts: hygrothermal section, vapor pressure, heat flow rate density and thermal transmittance.

. In hygrothermal section, annual and daily trend results of temperature and relative humidity values, both from the outside, ventilated cavity and from the indoor environment, were shown.

Annual temperature data collected were analyzed. As a result, it was found that temperature in the cavity had been slightly higher than that of the outside but with the same behavioral trend. In addition temperature of the cavity has reflected a buffering, especially in lower oscillatory values of outside temperature.

With respect to the external relative humidity, it was estimated that there were 3845 hours in the year in which it had been greater than 79%. Relative humidity values in the cavity reflect a buffering of the external relative humidity behavior. With respect to the cavity it has been found that the cavity has ten months in the year a higher absolute humidity value than outside.

. In the vapor pressure section, vapor pressure mean values were extracted. Differences of values were obtained and diffusion movements of the water vapor through the envelope were analyzed. This differences were oscillated between -205Pa (Pve-Pvc) in November 2008 and 95Pa (Pvc-Pvi) in August. Results concluded that there is no clear tendency of the movement of drying and wetting of the envelope at times and that the contribution of the cavity to the drying of the envelope is not clear. In fact of the total amount of 7990 hours monitored, potential movement of diffusion of water vapor in the interior has been of 44% against the potential of diffusion towards the exterior 55%. It was observed that raising the temperature inside the room improved the drying potential of the envelope by increasing the diffusion movement of water vapor outwards.

Water vapor diffusion movements related to temperatures were defined, both between the exterior and the cavity, and between the interior and the cavity.

. Results of **surface temperatures** on the inner face of the envelope showed variability between 17.40°C and 18.60°C. A vertical stratification of temperature was found. This was corroborated by two different instrumentations. A horizontal stratification was also detected, increasing the temperature value as the envelope is introduced into the building. This analysis

led to the choice of the best position of the envelope for the collection of heat flux density values. The thermal delay of the ventilated façade was experimentally obtained obtaining a time of 4 hours and 23 minutes.

As for the values collected from the **internal heat flux density**, a mean of the entire monitoring period of $-8,74\text{W/m}^2$ was obtained, with a maximum value of $-5,37\text{W/m}^2$ and a minimum of $-12,76\text{W/m}^2$, ie always of negative value meaning that the movement of the flow is a sense of loss, from the inside and towards the outside of the envelope. The cycle of your daily behavior goes against the outside temperature. In relation to Pearson's correlations, the strongest and most significant correlation (2 tails) found was with the internal temperature $r = 0,91$.

In the case of the **external heat flow rate density**, an average of the entire monitoring period of $-1,84\text{W/m}^2$ was obtained, with a maximum value of $1,35\text{W/m}^2$ and a minimum of $-4,94\text{W/m}^2$. In this case positive values have been reached; alternating the flow direction, ie, the movement of the positive flow is a sense of gain, from the outside and in the interior. In the analysis of the daily flow, it was found that its value in some moments was 0. A temporal pattern of the envelope was observed in that monitored period was in phase with outside temperature behavior. When analyzing Pearson's correlations, the strongest and most significant correlation (2 tails) was detected with a temperature difference with a value of $r = -0,892$

By subtracting values of q_i and q_e , parameter q_l was obtained. This parameter was incorporated in Pearson's correlation analysis. It was found that the interior temperature next to the relative humidity inside were variables that most correlate with it and significantly. Specifically with the relative humidity, it was obtained a Pearson correlation coefficient of $r = 0.4927$

Linear regression analysis procedure was applied to find out how much measured parameters were explainable. The regression equations were obtained to explain the behavior of the internal and external heat flow rate density. Results indicated that external and internal relative humidity as a second-order variable (during the rainy period and throughout the period). Even precipitation was even obtained as the third independent variable.

. In order to know and quantify **thermal transmittance value**, average method of ISO 9869: 2014 was followed. Due to the type of envelope analyzed, thermal mass factors had to be calculated. These factors served to perform a correction of heat flux rate density value and consequently of thermal transmittance. A third monitoring period was chosen that met the conditions established by the standard. The curve was represented, obtaining U-value of $0,73\text{ W/ m}^2\text{K}$. Having monitored two positions, and performed the calculations, values that differed in magnitude were found. U-value at position 3 was $1,30\text{ W/m}^2\text{K}$, resulting in a difference of 78% from the initial recorded value at position 2. Finally, in the final verification of sensors measurement, it was deduced that, during the time the test lasted, there were contact deficiencies in the sensor 3, specifically between the sensor surface and the wall surface.

After these results obtained from the experimentation, results of the sensitivity analyzes of the numerical simulation performed are then presented.

V

RESULTADOS DE ANÁLISIS NUMÉRICO DE SIMULACIÓN

Mediante la utilización de la herramienta de análisis numérico de simulación con el software Wufi Pro 5.3, este capítulo V se centra en la obtención de resultados sobre el comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada de granito. Estas herramientas se plantean útiles ya que nos permitirán obtener información relevante. Pero también es preciso advertir de las limitaciones que este tipo de herramientas posee y que son relativas principalmente al modelo matemático de cálculo de humedad y calor elegido. Es de reseñar que el modelo y software higrotérmico elegido para este análisis está ampliamente validado por la comunidad científica, como ya se ha advertido previamente.

Los resultados obtenidos de los análisis de sensibilidad realizados con esta herramienta responderán fundamentalmente a las preguntas de investigación sobre la variabilidad de los diferentes parámetros que influyen en el comportamiento higrotérmico de la fachada en el clima de A Coruña. Si se realizasen todas estas pruebas in situ sería mucho más costoso y lento.

El capítulo V se inicia con la exposición de los resultados obtenidos para la caracterización hídrica y térmica del cerramiento. Seguidamente se realizan estudios de sensibilidad ambiental según parámetros de clima, orientación, lluvia incidente, densidad de tasa de flujo de calor, y finalmente de las características de los materiales tales como espesores de granito, poliuretano, cámara de aire, materiales, humedad relativa y tiempo.

Concretamente, la primera parte del capítulo es una descripción higrotérmica de este cerramiento en el clima de A Coruña, es decir, se analizan las temperaturas y humedades relativas en las que operan los materiales componentes y cómo es el comportamiento del flujo de calor. En concreto, las preguntas que se pretenden responder han sido las siguientes:

- . ¿Cuál es el comportamiento de temperatura superficial en los materiales componentes según las estaciones y a lo largo del año?
- . ¿Cuál es el comportamiento de la humedad relativa en los materiales componentes según las estaciones y a lo largo del año?

- . ¿Cuál es la cantidad de humedad absoluta de la cámara de aire a lo largo del año?
- . ¿Cuál es el comportamiento de flujo de calor en la fachada a lo largo de un año?
- . ¿Cuál es la contribución del flujo de calor latente de esta fachada en este clima?

La influencia del ambiente, según los investigadores, se advierte de gran relevancia y esencial en los cerramientos. Es, por tanto, que la segunda parte del capítulo se centra en exponer los resultados obtenidos de los análisis de sensibilidad de parámetros ambientales tanto del clima como de la orientación y lluvia incidente. El planteamiento de estos análisis de sensibilidad ha sido realizado para dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación planteadas:

- . ¿Cuál es el clima en el que este tipo de cerramiento seca menos? ¿Cómo se comportarían los materiales?, ¿cuál es la diferencia del valor-U del mismo muro entre el clima más seco y el clima más húmedo? ¿Qué variación existe? ¿Es significativa?
- . ¿Cuál es la orientación en la situación de A Coruña en el que seca menos el muro de fachada?
- . ¿Existe influencia en la lluvia incidente, se empeoran las condiciones hídricas, es decir, seca menos el muro?
- . ¿Qué cantidad de flujo de calor total se pierde en esta tipología de muro en el clima de A Coruña? ¿Y en el clima más seco? ¿Cuánto es el flujo debido al calor latente, es decir, a los cambios de estado del agua en el clima más seco y en el más húmedo? ¿Correlaciona la humedad relativa ambiental con el flujo de calor latente?

En la tercera parte del capítulo se exponen los resultados de los análisis de sensibilidad de la variación de parámetros relativos a los materiales componentes del cerramiento tales como el poliuretano, cámara de aire, granito, materiales de cerramiento interior.

- . ¿Existe una influencia del espesor del aislamiento en el secado del muro? ¿Lo retrasa o lo aumenta?
- . ¿El grado de renovación de la ventilación en la cámara de aire mejora el secado del muro? ¿El mayor espesor de la cámara de aire mejora también el secado del muro? ¿La humedad absoluta se reduce?
- . ¿El espesor del aplacado de granito influye en el aumento del contenido total de agua en el muro?
- . ¿La diferente composición de los materiales en el muro influye en el tiempo de secado del muro?

Una cuarta y última parte recoge los resultados del comportamiento de la fachada a lo largo del tiempo que responde a la pregunta de:

- . ¿Cómo se comportaría el contenido de agua en el muro a lo largo del tiempo?

Finalmente el capítulo V acaba con una síntesis crítica de todos los resultados obtenidos para dar respuesta a estas preguntas planteadas.

V.1 CARACTERIZACIÓN DE LA FACHADA VENTILADA DE GRANITO

La fachada ventilada del granito incorporada al software para la caracterización es la situada en el edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña de la Universidad de A Coruña. Está realizada con aplacado de granito abujardado de $e=3$ cm dispuesto al exterior. Tras el granito, una cámara de aire sectorizada verticalmente cada 60cm y ventilada horizontalmente con huecos de 3cm de altura, y que posee $e=5$ cm. Un aislamiento de poliuretano proyectado de $e=3$ cm. Finalmente como soporte del cerramiento está situado un muro de hormigón $e=24$ cm que remata con un enfoscado y acabado de yeso interiormente. En ocasiones este cerramiento presenta un revestimiento interior de aplacado amortiguado de granito se similares características.

Para el cálculo higrotérmico se han utilizado las propiedades de los materiales de la base de datos del software Wufi Pro 5.3. Para el clima se ha dispuesto los datos obtenidos de la base de datos de *Meteonorm*. Estos datos han sido especificados ya en el capítulo III. Los resultados recogidos del programa son organizados y representados en los apartados térmico e hídrico. El programa también recoge una película expresando las variaciones de temperatura, contenido de humedad y humedad relativa, incluso de densidad de tasa de flujo de calor.

V.1.1 COMPORTAMIENTO TÉRMICO

Se procede inicialmente a realizar el análisis del comportamiento de la temperatura ambiental y la temperatura superficial en el granito a lo largo del año. En las siguientes figuras se muestra a lo largo del año la temperatura ambiental y la temperatura en la superficie exterior del granito. Debido a la dificultad de representación de las variaciones térmicas anuales se ha elegido analizar gráficamente su comportamiento de forma trimestral.

En la figura V.1 se observan los resultados del primer trimestre, los correspondientes a los meses de enero, febrero y marzo. De su representación se deduce que, durante este periodo, la temperatura superficial del granito es siempre ligeramente superior a la ambiental.

En el caso de los meses siguientes, abril, mayo y junio, la temperatura superficial exterior del granito se va igualando a la ambiental. En el último mes incluso, la temperatura ambiental es inferior a la temperatura superficial del granito.

En el caso de los meses de julio, agosto y septiembre se combinan las tres tendencias posibles. Inicialmente en el mes de julio, la temperatura ambiental (línea roja en discontinua) es ligeramente inferior a la superficial.

A principios del mes de agosto, la temperatura ambiental es similar a la superficial, siendo en algún momento la temperatura ambiental superior (línea negra), situación ésta que se hace más frecuente durante el mes de septiembre.

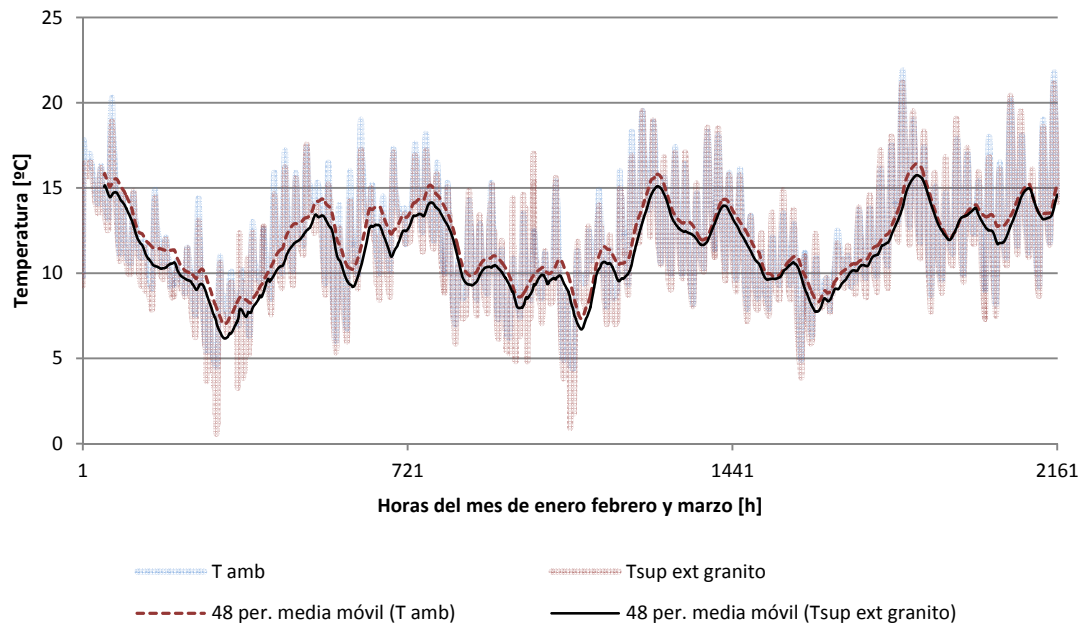


Figura V.1: Temperatura ambiental y de superficie en el granito en °C de los meses de enero, febrero y marzo. Resultados Wufi Pro 5.3

En el último trimestre de octubre, noviembre y diciembre, vuelve a producirse la tendencia del primer trimestre analizado, que es que la temperatura superficial, en general es inferior a la temperatura ambiental que se ha producido. Es de destacar que lo analizado son las tendencias trimestrales, las variaciones horarias aquí no están analizadas.

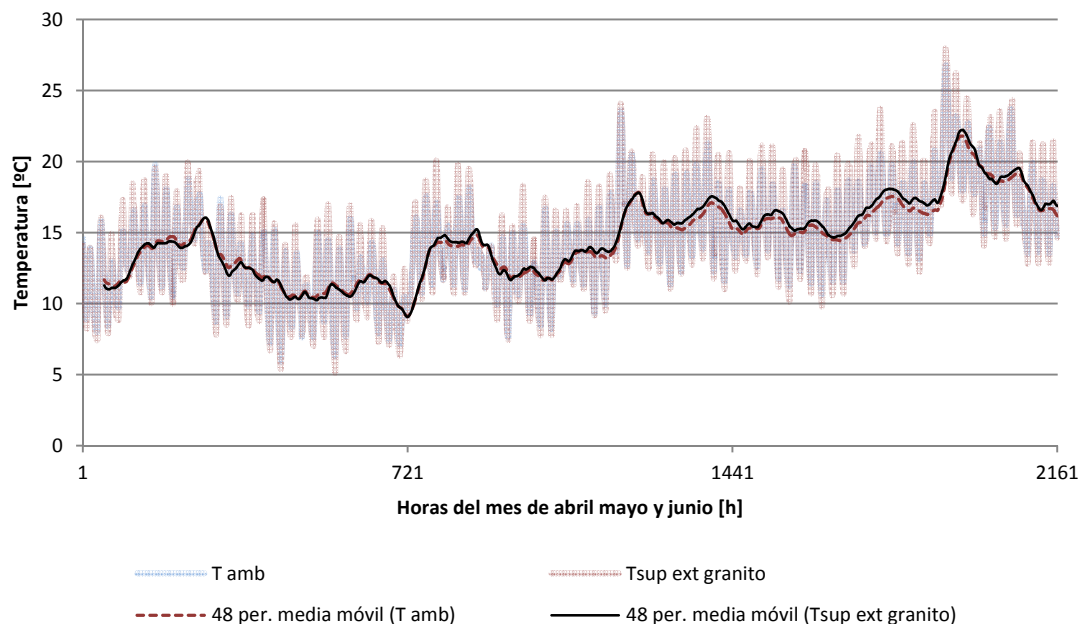


Figura V.2: Temperatura ambiental y de superficie en el granito en °C de los meses de abril, mayo y junio. Resultados Wufi Pro 5.3

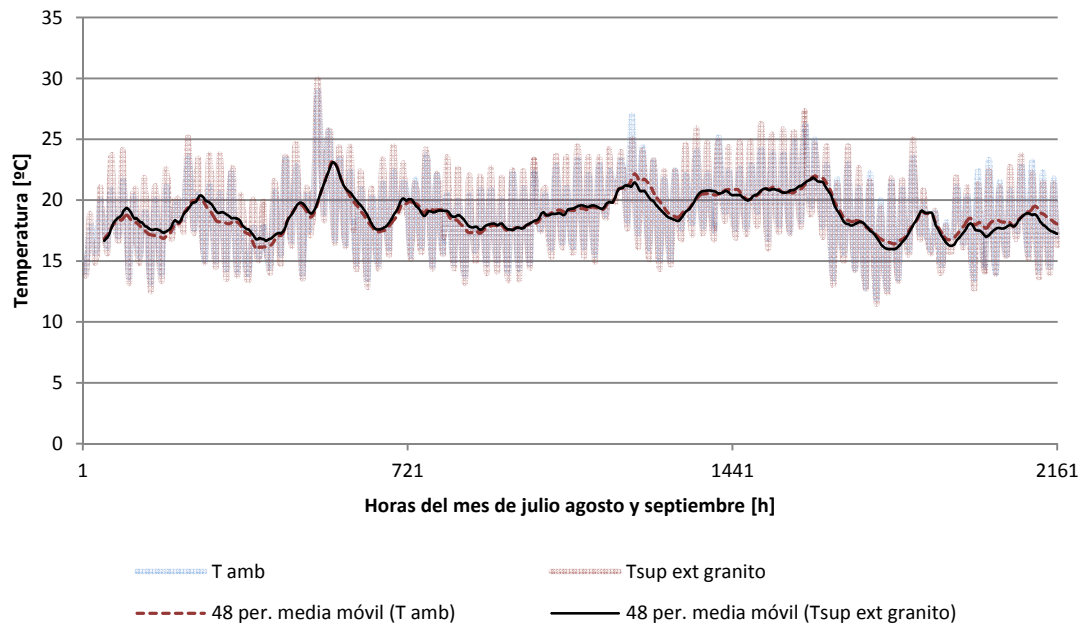


Figura V.3: Temperatura ambiental y de superficie en el granito en °C de los meses de julio, agosto y septiembre. Resultados Wufi Pro 5.3

Se concluye que a lo largo del año, la tendencia de la temperatura superficial en el granito va pareja con la temperatura ambiente, si bien hay algunos altibajos. En el primer y último trimestre, es claramente inferior a la de la temperatura ambiente. Sin embargo, durante los trimestres intermedios, segundo y tercero, se produce una alternancia, siendo durante una temporada similar las dos temperaturas, y manifestándose un aumento de la temperatura superficial a la ambiental en el verano y volviendo a un comportamiento similar antes de ser claramente inferior.

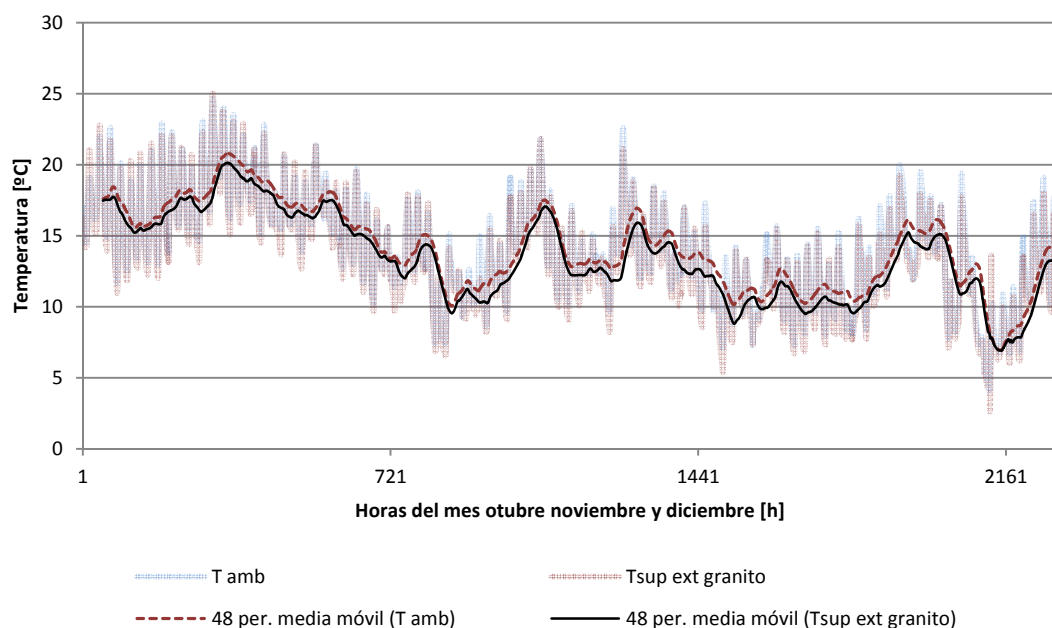


Figura V.4: Temperatura ambiental y de superficie en el granito en °C de los meses de octubre, noviembre y diciembre. Resultados Wufi Pro 5.3

Los siguientes valores expuestos analizan qué es lo que está sucediendo de forma diaria con respecto a la temperatura en los diferentes materiales que conforman el cerramiento. Se ha procedido a elegir días que representen situaciones climáticas estacionales.

Se analizan ahora los valores de temperatura en cinco posiciones indicadas en la figura V.5. La primera en la cara superficial exterior del granito, la segunda en la cara superficial interior del aplacado de granito, la tercera en la cara exterior del poliuretano, la cuarta entre el poliuretano y el hormigón. Finalmente la posición 5 en la superficie interior. Estas posiciones son indicadas para poder conocer la progresiva graduación de la temperatura superficial en los distintos materiales que lo conforman y como se reparten estos saltos térmicos entre el interior y el exterior.

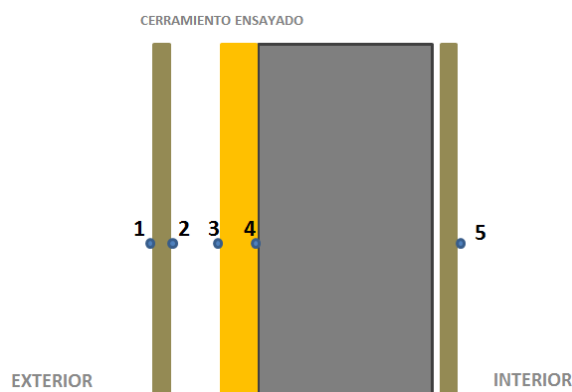


Figura V.5: Posiciones de los resultados obtenidos de temperatura superficial en $^{\circ}\text{C}$

De todos los valores anuales recogidos de la simulación, se ha procedido a elegir un día de cada estación climática: primavera, verano, otoño e invierno. El día elegido fue el central de cada estación (45 días a partir del solsticio o del equinoccio). Los valores de temperaturas superficiales fueron elegidos cada tres horas desde las 9:00 horas de la mañana hasta las 21:00 horas de la noche, obteniendo el perfil térmico diurno del cerramiento.

El primer análisis recogido se corresponde con el invierno. Ha sido elegido el día 1 de febrero. La variación de la temperatura superficial interior es reducida, debido a las condiciones que se han dispuesto previamente en la simulación. La temperatura superficial exterior ha sido de una amplitud de aproximadamente 6°C . Las temperaturas a lo largo del día son variables en los materiales dispuestos del aislamiento hacia el exterior. La amplitud de variación de temperatura después del aislamiento es mínima en relación al resto. Las temperaturas registradas son progresivamente superiores hasta alcanzar la temperatura superficial interior.

1 febrero

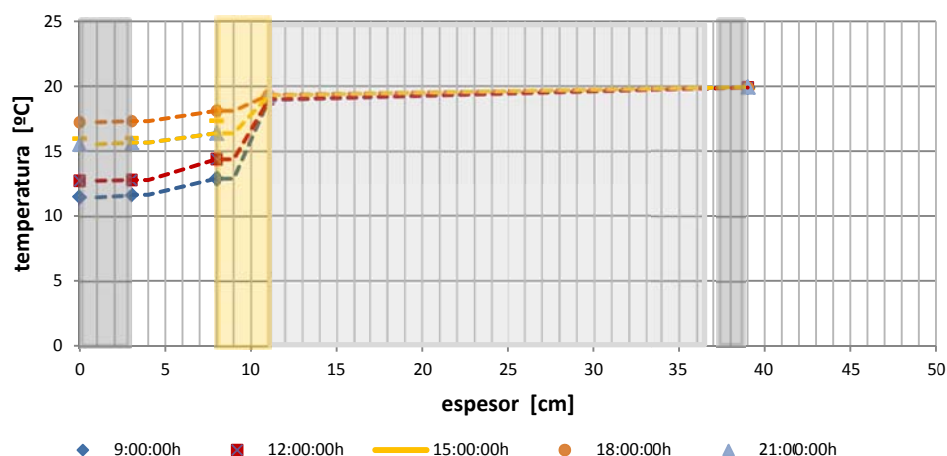


Figura V.6: Tendencia diurna de temperaturas superficiales en °C durante un día de invierno en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Wufi Pro 5.3

Hora	Exterior	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Interior
09:00:00	12,4	11,5	11,6	12,9	18,9	19,9	20,5
12:00:00	14,1	12,7	12,8	14,4	18,9	19,8	20,5
15:00:00	17,4	15,9	16,0	17,4	19,2	19,9	20,5
18:00:00	18,1	17,2	17,3	18,1	19,3	19,9	20,5
21:00:00	16,1	15,5	15,7	16,4	19,3	19,9	20,5

Tabla V.1: Temperatura en °C en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de invierno en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Se puede observar en esta figura el rango de variación entre las nueve de la mañana hasta las nueve de la noche de un día de invierno. Temperaturas que oscilan entre 11,49°C y 17,22°C en la superficie exterior del cerramiento de granito y 19,89°C en la temperatura superficial interior también del granito.

En el caso de un día de primavera, el 1 de mayo, la tendencia de la correspondencia de la mayor amplitud térmica con la superficie de los materiales que están hacia el exterior después del aislamiento. Por el contrario, es mínima la variación en el interior. La amplitud térmica en el exterior indicada es de aproximadamente de 6 a 7°C

1 mayo

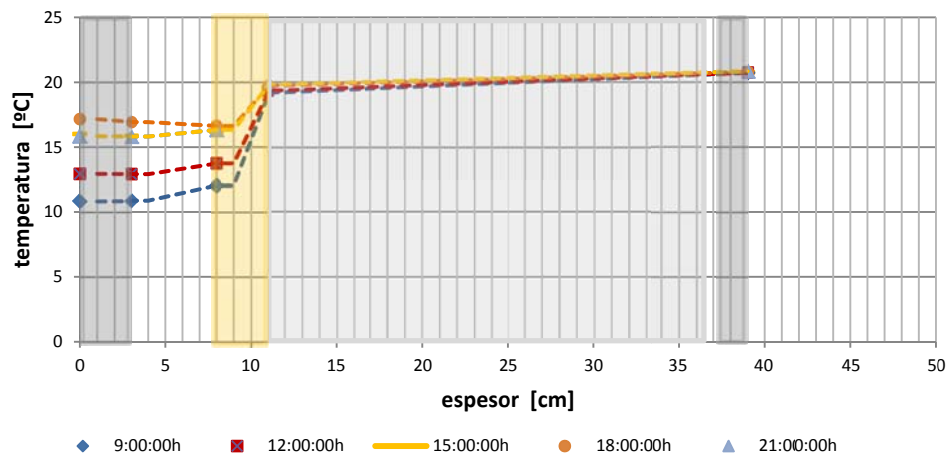


Figura V.7: Tendencia diurna de temperaturas superficiales en °C durante un día de primavera en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Wufi Pro 5.3

Hora	Exterior	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Interior
09:00:00	11,4	10,9	10,9	12,0	19,2	20,7	21,8
12:00:00	13,0	12,9	12,9	13,7	19,4	20,7	21,8
15:00:00	15,1	16,0	15,9	16,2	19,6	20,8	21,8
18:00:00	15,6	17,2	16,9	16,6	19,7	20,8	21,8
21:00:00	15,7	15,8	15,8	16,3	19,8	20,9	21,8

Tabla V.2: Temperatura en °C en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de primavera en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Con respecto a un día de verano, 1 de agosto, la temperatura sigue la misma tendencia de amplitudes que en las otras épocas del año. Contrastando con los meses precedentes, aquí se llega a momentos en los que no existe diferencia de temperatura entre el interior y el exterior. Es a las 15:00 horas y a las 21:00 horas donde la diferencia en todas las superficies del cerramiento es mínima.

En este periodo ocurre que la temperatura superficial exterior es superior a la de la temperatura superficial interior del cerramiento por lo que la tendencia de la elevación de las temperaturas superficiales a medida que se acercan al interior es ahora de forma opuesta, rebajándose la temperatura progresivamente a medida que se alcanza la temperatura superficial interior.

1 agosto

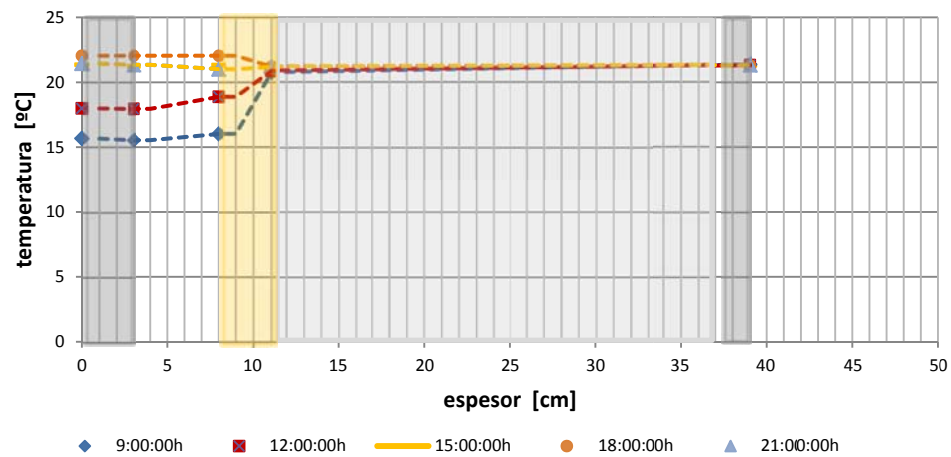


Figura V.8: Tendencia diurna de temperaturas superficiales en °C durante un día de verano en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Wufi Pro 5.3

Hora	Exterior	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Interior
09:00:00	15,4	15,7	15,5	16,0	20,8	21,3	21,5
12:00:00	18,7	18,0	17,9	18,9	20,9	21,3	21,5
15:00:00	21,3	21,4	21,2	21,3	21,1	21,3	21,5
18:00:00	22,1	22,0	22,0	22,0	21,2	21,3	21,5
21:00:00	20,7	21,4	21,3	21,0	21,2	21,3	21,5

Tabla V.3: Temperatura en °C en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de verano en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Finalmente en el caso de un día de otoño, 1 de noviembre, las temperaturas exteriores son menores que las interiores. La amplitud térmica en la cara superficial del granito ha sido de 5°C. Se sigue la misma tendencia del resto del año en la que la amplitud térmica se reduce una vez pasado el aislamiento de poliuretano.

Es de observar la tendencia debido a la posición del aislamiento por el exterior que la caída de temperaturas en las capas se produce tras la finalización del aislamiento. La temperatura del hormigón se mantiene bastante estable en estas simulaciones.

1 noviembre

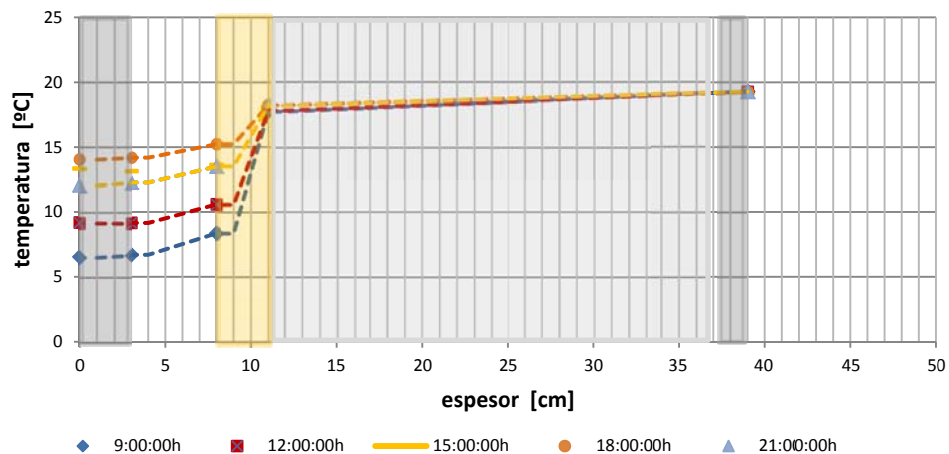


Figura V.9: Tendencia diurna de temperaturas superficiales en °C durante un día de otoño en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Wufi Pro 5.3

Hora	Exterior	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Interior
09:00:00	7,4	6,5	6,7	8,4	17,8	19,3	20,1
12:00:00	9,8	9,2	9,2	10,6	17,8	19,2	20,1
15:00:00	13,0	13,3	13,2	13,6	18,1	19,2	20,1
18:00:00	15,1	14,1	14,27	15,2	18,2	19,2	20,1
21:00:00	13,2	12,19	12,3	13,5	18,2	19,3	20,1

Tabla V.4: Temperatura en °C en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de otoño en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Se puede concluir que las variaciones en la temperatura superficial interior son mínimas. La variabilidad encontrada con estos resultados ha sido de 2°C aproximadamente. Las amplitudes máximas se corresponden con aproximadamente 8°C y con las temperaturas superficiales exteriores. Con estos cuatro días elegidos, la temperatura superficial mínima exterior marcada ha sido a las 12:00 horas del 1 de noviembre con 6,97°C. Por el contrario, es en el mes de verano, 1 de agosto donde se indica 22,19°C a las 18:00 horas. Las temperaturas superficiales exteriores máximas diarias se han obtenido a las 18:00 horas. Las temperaturas superficiales exteriores mínimas diarias, se han obtenido a las 9:00 horas.

Para observar con mayor detalle cual ha sido el comportamiento térmico de la hoja exterior de aplacado de granito, se procede a analizar con más detenimiento la temperatura, la temperatura superficial interior y la exterior del aplacado en los cuatro días representativos de las estaciones climáticas: de la primavera el 1 de mayo, del verano el 1 de agosto, del otoño el 1 de noviembre y del invierno 1 de febrero.

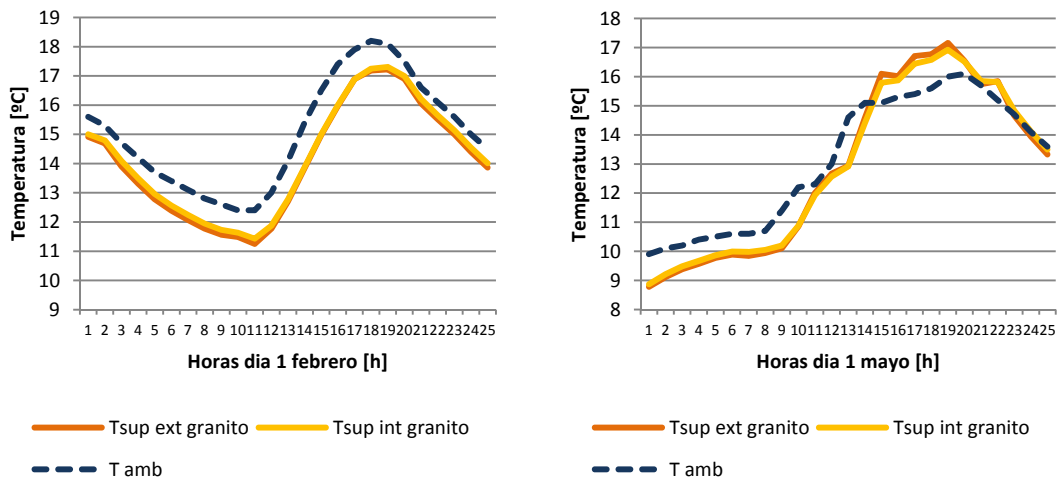


Figura V.10: Temperatura ambiental y temperatura superficial exterior e interior del granito a lo largo del día 1 de febrero (izquierda) y 1 de mayo (derecha)

En el caso del 1 de febrero, la temperatura ambiental (en discontinua) es superior a la temperatura superficial del granito. En el caso de las superficies, hay que decir que es hasta las 11 de la mañana cuando la temperatura superficial exterior es inferior a la interior. A partir de las 11 horas y hasta las 19 horas las temperaturas superficiales apenas han cambiado. Finalmente a partir de las 19 horas, la temperatura superficial exterior vuelve a ser inferior a la del interior.

El día 1 de mayo, sin embargo, la temperatura ambiental no es superior en todo el día. Lo es hasta las 14 horas. En este momento se invierte, teniendo las superficies del granito más temperatura que la ambiental. Al final del día las tres temperaturas siguen la misma tendencia. En el caso de las temperaturas superficiales, durante el inicio del día la temperatura superficial interior es superior a la exterior, desde aproximadamente las 9 horas se iguala a la del exterior, de 15 a 19 horas es la temperatura exterior la mayor y finalmente vuelve la cara interior a última hora del día a ser superior.

En el caso del 1 de agosto parece un amortiguamiento de la temperatura, la temperatura del ambiente es inferior durante la noche hasta aproximadamente las 7 horas. A partir de ahí se convierte en la temperatura máxima y es a partir de las 19 horas cuando la temperatura ambiental vuelve a ser el valor mínimo de las tres. En el caso de las temperaturas superficiales, es la cara interior la que posee mayor temperatura hasta las 9 horas. Desde las 9 horas las temperaturas son prácticamente iguales y nuevamente es la temperatura interior la superior durante el inicio de la noche.

Finalmente en el caso del día 1 de noviembre, la temperatura ambiental es superior desde la noche hasta las 19 horas. Durante las 20 horas se igualan para finalmente volver a ser superior la temperatura ambiental. La tendencia de las temperaturas superficiales, es aquí nuevamente encontrada. Se produce la máxima temperatura en la cara interior durante la noche, es durante el día donde se igualan o incluso llegar a ser levemente la del exterior superior, pero finalmente a la noche vuelve la temperatura superficial interior a ser superior.

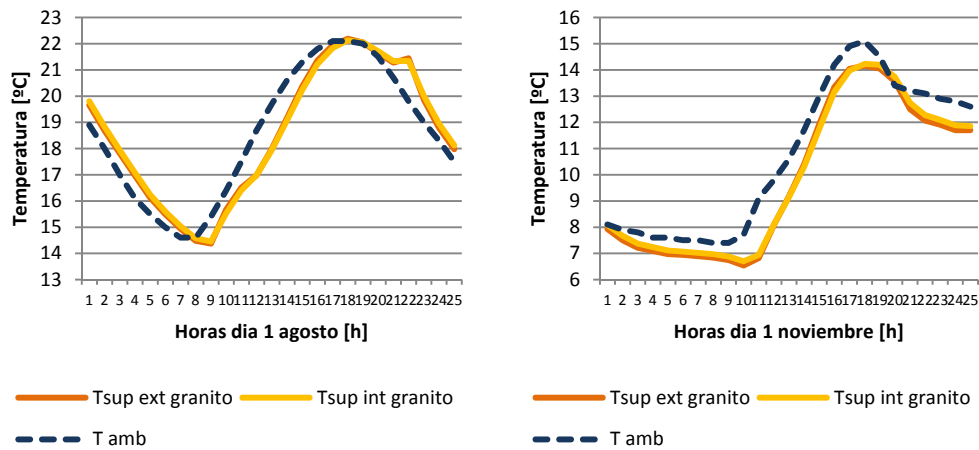


Figura V.11: Temperatura ambiental y temperatura superficial exterior e interior del granito a lo largo del día 1 de agosto (izquierda) y 1 de noviembre (derecha)

Se concluye que los días que representan al otoño y al invierno, la temperatura de la superficie exterior del cerramiento permanece por debajo de la temperatura ambiente. En cuanto a las temperaturas superficiales, la de la cara interior, que da a la cámara, es superior por la noche. Durante el día son prácticamente iguales. En el caso de los días que representan a la primavera y al verano, el sol de la tarde incide en la fachada y calienta la superficie exterior del aplacado. En estos días también la temperatura de la cara interior es superior por las noches, pero en menor grado.

V.1.2 COMPORTAMIENTO HÍDRICO

Seguidamente se procede a mostrar los resultados del análisis de la humedad relativa ambiental y superficial en el granito. Se han utilizado también las figuras trimestrales.

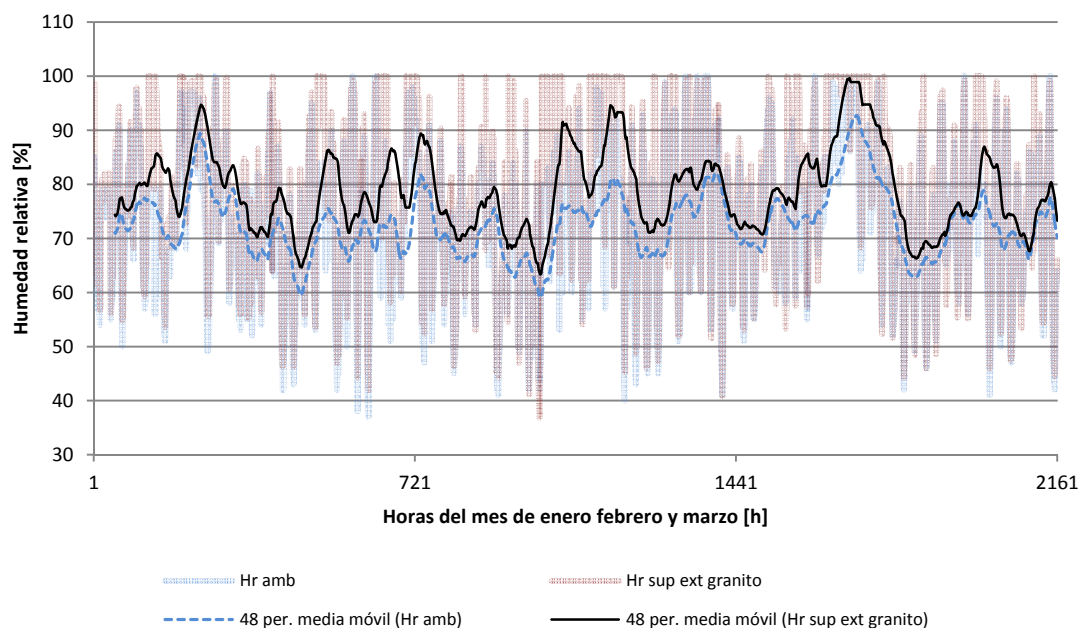


Figura V.12: Humedad relativa ambiental y de superficie en el granito en % de los meses de enero, febrero y marzo. Resultados Wufi Pro 5.3

En la figura V.12 se puede deducir claramente que la humedad relativa en la superficie exterior del granito (línea negra) es ligeramente más alta que la ambiental (azul discontinua). Sin embargo, a final del mes de marzo, las humedades relativas tienden a los mismos valores.

En el caso del siguiente trimestre, de abril, mayo y junio, figura V.13 no es hasta el mes de junio cuando la tendencia de la humedad relativa ambiental es muy similar, excepto en los valores de picos máximos, donde la humedad relativa superficial es superior a la ambiental.

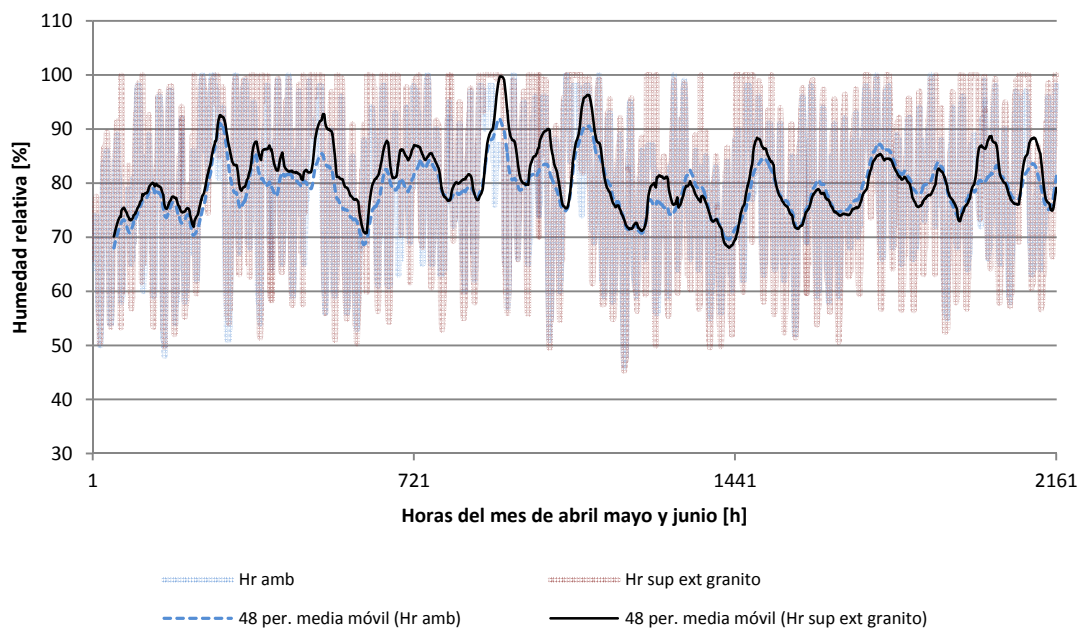


Figura V.13: Humedad relativa ambiental y de superficie en el granito en % de los meses de abril, mayo y junio. Resultados Wufi Pro 5.3

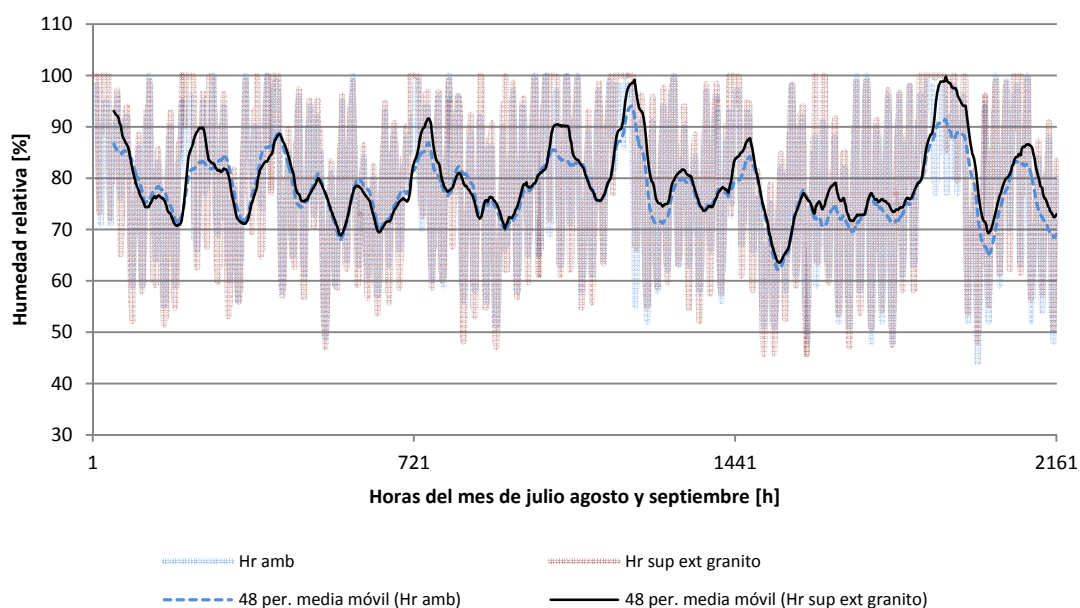


Figura V.14: Humedad relativa ambiental y de superficie en el granito en % de los meses de julio, agosto y septiembre. Resultados Wufi Pro 5.3

En la figura V.15 del tercer trimestre, julio, agosto y septiembre, la tendencia sigue en general siendo la misma. Los valores máximos suelen ser superiores los de la humedad relativa superficial. En cuanto a los valores mínimos, si bien los valores son prácticamente iguales es a final del mes de septiembre donde los picos inferiores la humedad relativa ambiental es menor.

En el trimestre final, se confirma la tendencia del trimestre inicial, donde la humedad relativa ambiental es inferior en valor durante todo el tiempo. Los valores de la humedad relativa superficial del granito son normalmente superiores. También se verifica que el comportamiento oscilatorio de la humedad relativa ambiental es similar al de la superficie del hormigón.

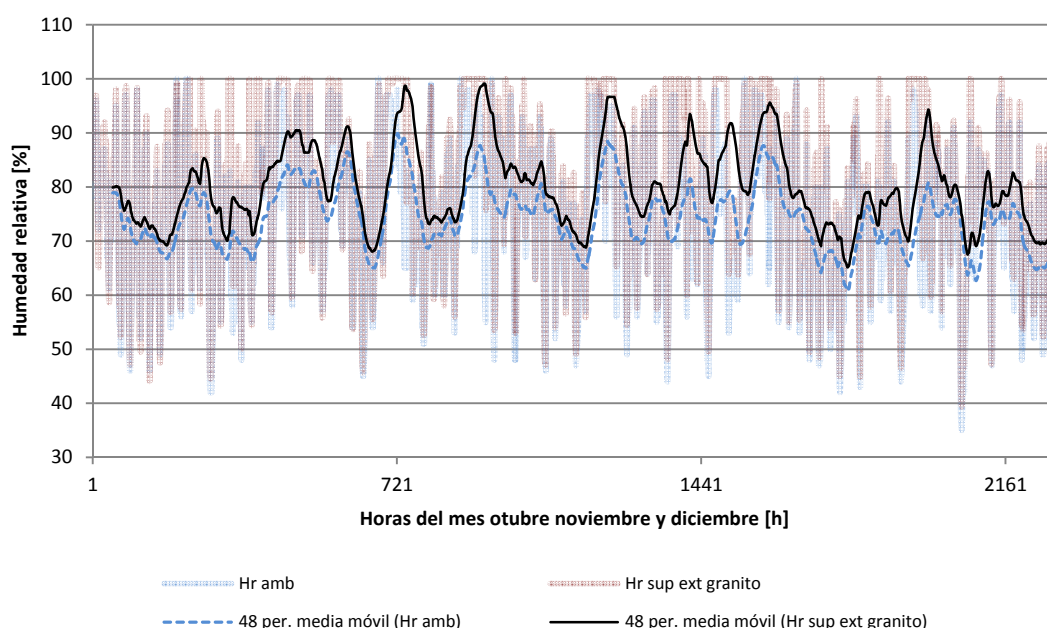


Figura V.15: Humedad relativa ambiental y de superficie en el granito en % de los meses de octubre, noviembre y diciembre. Resultados Wufi Pro 5.3

Se concluye que la humedad relativa superficial del granito es superior a la humedad relativa ambiental, manifestándose un comportamiento similar pero desplazado. Esto podría ser explicado porque estos meses son los meses de mayores precipitaciones que ha tenido esta localización, pudiendo llegar el agua a la fachada, y al ser absorbida por el granito y mantener una humedad higroscópica más alta, se produciría una humedad relativa ligeramente superior a su entorno. En el resto de los meses, las amplitudes de la humedad relativa de la superficie son superiores en los picos con más valor en relación a la humedad relativa ambiental, que se llega a valores inferiores. En cuanto a los valores mínimos estos coinciden normalmente.

De la misma forma que se realizó el análisis térmico, se procede ahora a expresar el comportamiento diario de la humedad relativa en las distintas posiciones del aislamiento los valores obtenidos de simulación.

Las posiciones elegidas están indicadas en la figura V.16. Las horas elegidas para el análisis también han sido, como en el caso de la temperatura, cada 3 horas, comenzando desde las 9:00 horas de la mañana y finalizando a las 21:00 horas de la tarde.



Figura V.16: Posiciones de los resultados obtenidos de humedad relativa en % y foto de un aplacado de la fachada.

En el caso de un día de invierno, 1 de febrero, las mayores variaciones de humedad relativa se han registrado en la posición 1 y la 3, es decir, en la superficie del aplacado de granito exterior y en la superficie exterior del poliuretano, hacia la cámara de aire. Es de indicar que en la cara interior del aplacado de granito, durante este día de invierno, el valor mínimo de su humedad relativa es más elevado aquí que en el exterior. Por tanto, la posición 2 tiene menos amplitud de humedad relativa entre valores máximos y mínimos. La posición 4 y 5 son las que tienen muy poca o ninguna variabilidad de humedad relativa. La máxima humedad relativa exterior registrada es manifiestamente superior a la del interior.

1 febrero

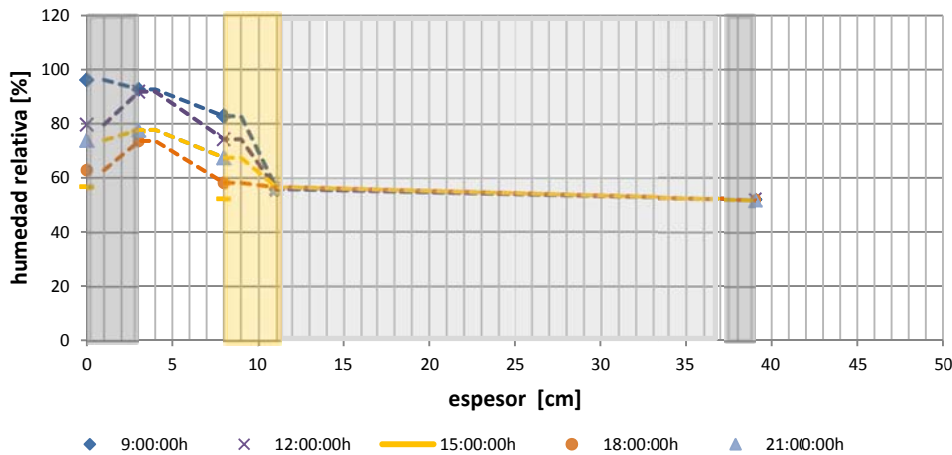


Figura V.17: Tendencia diurna de humedades relativas en % durante un día de invierno en las cinco posiciones (1-5) de la fachada ventilada de granito de A Coruña. Wufi Pro 5.3

Hora	Exterior	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Interior
09:00:00	91,0	96,2	92,7	82,8	55,8	52,0	50,1
12:00:00	72,0	79,7	91,9	74,3	55,8	52,0	50,1
15:00:00	51,0	56,8	77,3	52,3	56,2	52,1	50,1
18:00:00	59,0	62,9	73,6	58,2	56,6	52,0	50,1
21:00:00	71,0	74,0	77,7	67,5	56,5	51,9	50,1

Tabla V.5: Humedad relativa % en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de invierno en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

La tendencia de variación también se repite en el caso de un día de primavera, 1 de mayo, donde son las posiciones 1 y 3 las que poseen las mayores variaciones. Las humedades relativas son bastante elevadas con valores que casi alcanzan el 100% de humedad. En el caso de la cara interior del aplacado de granito la amplitud de humedad relativa es menor, siendo el valor mínimo superior al de su cara superficial exterior. Las humedades relativas de la posición 4 y 5 son prácticamente despreciables.

1 mayo

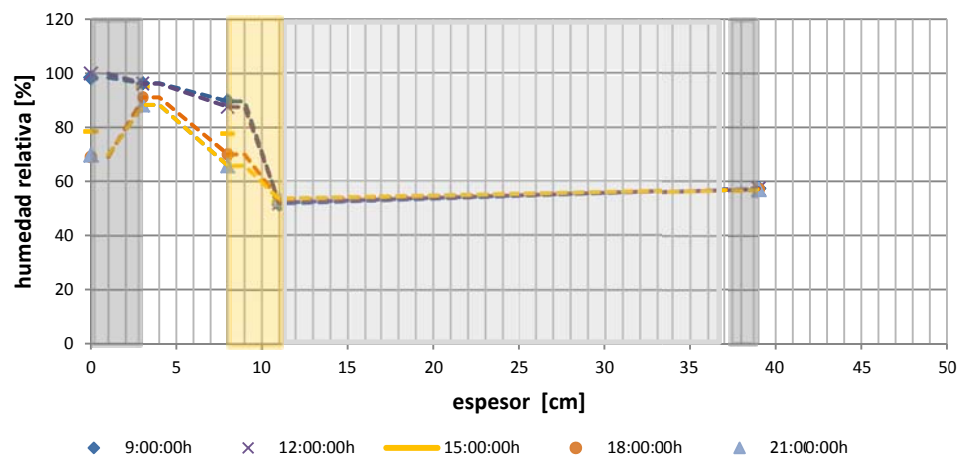


Figura V.18: Tendencia diurna de humedades relativas en % durante un día de primavera en las cinco posiciones (1-5) de la fachada ventilada de granito de A Coruña. Wufi Pro 5.3

Hora	Exterior	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Interior
09:00:00	93,0	98,4	96,3	89,7	51,8	57,4	53,6
12:00:00	87,0	99,9	96,2	87,6	52,1	57,4	53,6
15:00:00	79,0	78,5	95,1	77,7	52,7	57,3	53,6
18:00:00	74,0	69,1	91,1	70,0	53,2	57,2	53,6
21:00:00	69,0	69,8	88,3	65,8	53,6	57,0	53,6

Tabla V.6: Humedad relativa % en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de primavera en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

En el caso del día de verano siguen existiendo humedades relativas muy elevadas. La amplitud diaria de variación de la humedad relativa en la cara superficial interior del granito es también inferior pero menos relevante.

1 agosto

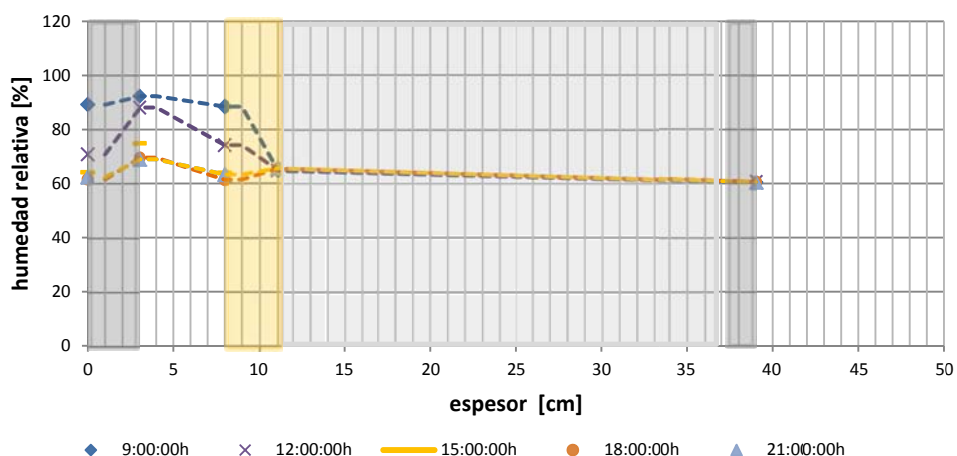


Figura V.19: Tendencia diurna de humedades relativas en % durante un día de verano en las cinco posiciones (1-5) de la fachada ventilada de granito de A Coruña. Wufi Pro 5.3

Hora	Exterior	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Interior
09:00:00	90,0	89,2	92,3	88,5	64,8	60,5	59,8
12:00:00	67,0	70,8	88,1	74,2	64,9	60,6	59,8
15:00:00	64,0	64,2	74,9	64,0	65,3	60,7	59,8
18:00:00	61,0	61,6	69,6	61,4	65,6	60,6	59,8
21:00:00	65,0	62,4	69,0	63,3	65,7	60,6	59,8

Tabla V.7: Humedad relativa % en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de verano en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

El día de otoño, 1 de noviembre, las tendencias registradas en las otras épocas del año, son también reflejadas aquí, es decir, posiciones 4 y 5 con unas humedades relativas estables y con las mayores variaciones diarias en la posición 1 y 3. Las humedades relativas alcanzan puntos máximos en la superficie exterior del aplacado de granito.

1 noviembre

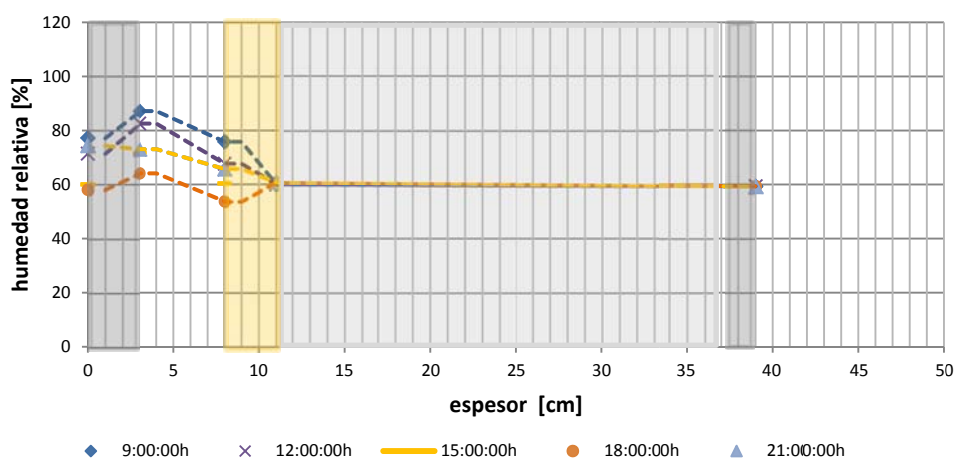


Figura V.20: Tendencia diurna de humedades relativas en % durante un día de otoño en las cinco posiciones (1-5) de la fachada ventilada de granito de A Coruña. Wufi Pro 5.3

Hora	Exterior	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Interior
09:00:00	72,0	77,2	87,2	75,8	60,1	59,3	56,2
12:00:00	68,0	71,4	82,6	67,7	60,1	59,4	56,2
15:00:00	61,0	60,1	71,8	60,4	60,4	59,4	56,2
18:00:00	54,0	58,1	64,2	53,8	60,8	59,4	56,2
21:00:00	69,0	74,4	73,1	65,7	60,8	59,3	56,1

Tabla V.8: Humedad relativa % en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de otoño en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Se concluye que los valores máximos de humedad relativa han sido registrados en la superficie exterior del aplacado de granito. Los valores mínimos han sido en la superficie interior. A lo largo de todo el año se ha detectado que normalmente la superficie interior del aplacado de granito poseía más humedad relativa interior que la superficie exterior, dando lugar en esta posición a diferencias de humedades relativas inferiores que la posición 1. Las variaciones en la superficie exterior han sido de aproximadamente el 40%. Las variaciones en la superficie interior han sido no relevantes, siendo muy estables estos valores.

Como era de esperar el granito, por ser el material de revestimiento, es el que soporta una mayor presencia de humedad en su interior, al estar expuesto a un ambiente más húmedo, tanto por la cara exterior como por la cara interior.

Finalmente se analizan las humedades relativas exterior e interior de la superficie del aplacado de granito exterior. Se hace necesario, pues, conocer la cantidad de humedad que posee este material y cuál es su comportamiento. Este hecho es relevante, ya que uno de los problemas detectados en la realidad es que se depositan cianobacterias y algas en la superficie exterior del granito. La cantidad de humedad en este material se advierte de suma importancia, así como algún patrón de comportamiento que pudiese existir.

A continuación se muestran los valores diarios de humedad relativa y temperatura de la cara exterior e interior del granito, a partir de los resultados del último año de simulación.

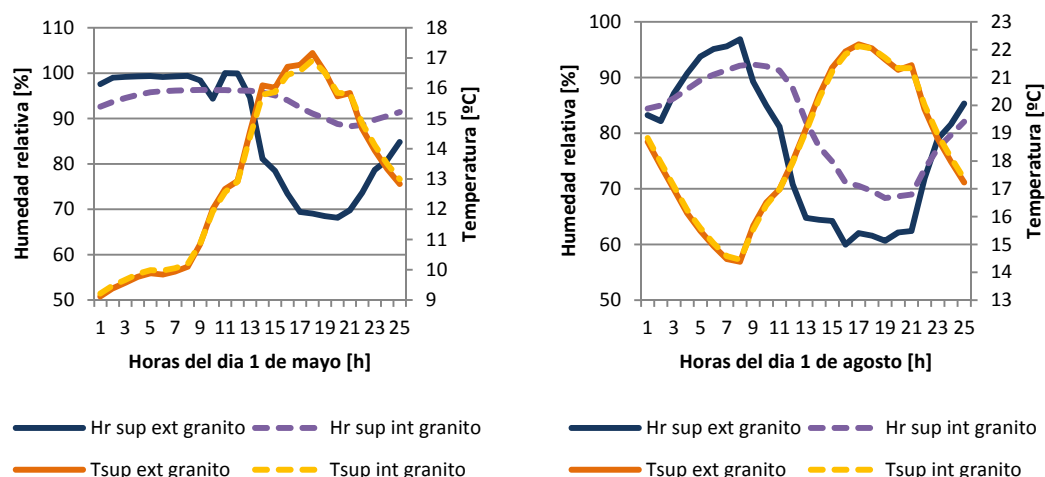


Figura V.21: Valores horarios del día 1 de mayo y 1 de agosto de la temperatura y humedad relativa superficial interior y exterior del granito

En el día 1 de mayo, se ha detectado una gran oscilación diaria en la humedad relativa superficial exterior del granito (línea azul continua). No sucede lo mismo con la humedad relativa superficial interior del granito, que no tiene esa gran oscilación y mantiene continuamente una humedad relativa superficial superior a la exterior. Puede verse con claridad en la figura.

El caso del 1 de agosto se observa la misma tendencia de las humedades relativas superficiales. Es la interior la que posee, en general, mayores valores.

Representado los resultados obtenidos de la simulación en el día 1 de noviembre, se mantiene nuevamente la tendencia de la mayor oscilación diaria de la humedad relativa superficial exterior del granito. Contrariamente en el interior donde existe menos oscilación, gráfica más tendida, pero con valores superiores.

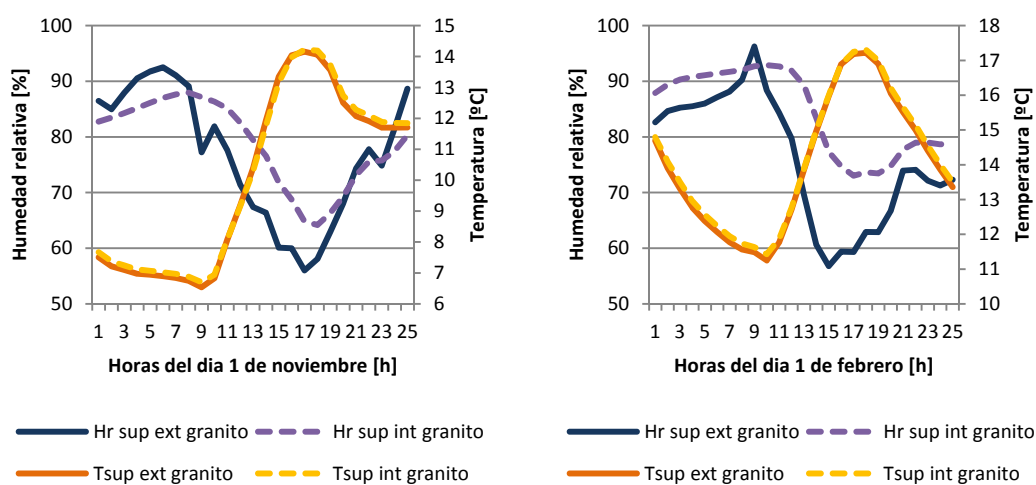


Figura V.22: Valores horarios del día 1 de noviembre y 1 de febrero de la temperatura y humedad relativa superficial interior y exterior del granito

Finalmente en el caso del invierno 1 de febrero, la humedad relativa superficial se comporta de la misma manera.

Se concluye que, de estos cuatro días analizados, los valores de la humedad relativa superficial interior son superiores a los del exterior, teniendo un patrón común que se ha advertido en tres de los cuatro días, excepto el día de invierno. Durante la noche, la humedad relativa superficial exterior es superior a la interior. Sin embargo, a partir de las 8 horas o más tarde, se invierten los valores, es decir, la humedad relativa superficial interior es superior a la del exterior para nuevamente volver a ser inferior durante la noche. El caso del 1 de febrero, prácticamente durante todo el día se ha advertido ser superior la humedad relativa superficial interior del granito.

Finalmente y para realizar el análisis del secado del cerramiento se ha recogido el resultado del contenido total de agua en Kg/m^2 . La curva y su pendiente van indicando cómo se va secando, puesto que se va reduciendo los kilos de agua en cada metro cuadrado. En este caso, se puede advertir que va secándose ligeramente. La tendencia de reducción del contenido total de agua es progresiva en estos cinco años y no se advierte que se haya alcanzado el equilibrio, es decir,

que la curva se vuelva horizontal. Se cumple la condición del estándar alemán DIN 4108-3 de no exceder en más de 1Kg/m^2 la cantidad de humedad por condensación, ya que el cálculo se ha iniciado al 80% de humedad relativa y el final no excede de más de 1Kg/m^2 sino que se reduce el valor.

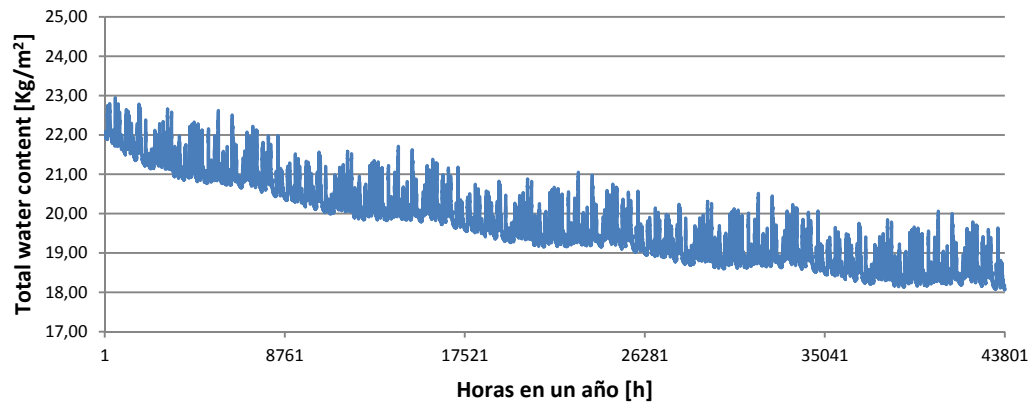


Figura V.23: Contenido total de agua en Kg/m^2 de la fachada ventilada de granito en A Coruña. Simulación realizada durante 5 años. Software Wufi Pro 5.3

Se concluye que en los cinco años simulados y con los materiales definidos, no se ha alcanzado el equilibrio hídrico de secado del cerramiento, ya que la curva no se ha dispuesto horizontalmente.

Para comprobar si existen condensaciones intersticiales, se ha utilizado un programa de cálculo denominado Condensa desarrollado por la FEUP. Este programa se basa en la aplicación de cálculos recogidos en la UNE EN ISO 13788. En él se han incorporado datos ambientales y de características de los materiales del cerramiento. Los resultados representan datos mensuales de presión de vapor y presión de vapor de saturación para verificar si existen condensaciones intersticiales en el cerramiento.

Del estudio realizado, se ha hallado que son los meses de diciembre, enero, febrero y marzo los que poseen mayor riesgo de condensaciones intersticiales. Estos valores han sido obtenidos a partir de datos representativos del mes. No se tiene en consideración la variabilidad diaria, por lo que no se puede obtener con exactitud esas condensaciones y su valor. Su cálculo habrá que ser realizado a partir de programas de simulación, aunque su cuantificación no se ha considerado motivo de estudio.

V.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Como se indicó en los capítulos anteriores, el Código Técnico de la Edificación C.T.E. DB HS-1, tiene un procedimiento para evaluar el grado de impermeabilidad de un cerramiento y así elegir los cerramientos con respecto a su comportamiento frente al agua. Se hace a través de parámetros ambientales como la velocidad media del viento, la precipitación, el tipo de terreno y altura de edificio. Pero también como se analizaba en el capítulo anterior, el problema que subyace en el procedimiento que tiene el Código Técnico de la Edificación es doble. Por una parte sería necesario conocer los datos climáticos conjuntos, es decir, las rachas de viento en el mismo momento en el que se produce la lluvia, es decir, clasificar el riesgo ambiental o de lluvia horizontal y por otra conocer cuánto de impermeable es el cerramiento elegido y/o diseñado.

El conocimiento del clima del lugar, así como el comportamiento frente al agua de los materiales que componen el cerramiento son parámetros importantes para responder a la hipótesis segunda. La *hipótesis segunda* suponía que el clima húmedo condicionaba el “peor” comportamiento higrotérmico y que Galicia, en particular, los mismos cerramientos empeoraban más que en otros lugares. Para encontrar las respuestas a esta hipótesis, se realizaron los siguientes análisis de sensibilidad.

V.2.1 INFLUENCIA DEL CLIMA

El clima de Galicia muestra que muchas de las localizaciones poseen condiciones desfavorables de lluvia y viento y consecuentemente un riesgo para el ingreso del agua en el cerramiento.

Tomando como base la localización de A Coruña, se hacen un análisis de sensibilidad variando las zonificaciones climáticas pero no el sistema constructivo de fachada ventilada de granito. En la tabla V.6 se muestran las ciudades y sus clasificaciones simuladas. Las ciudades elegidas han sido A Málaga, B: Palma de Mallorca, D: Madrid y en el caso de la C, se pone en contraste con otra clasificación C pero de una ciudad del mediterráneo, no del Atlántico: Barcelona. Para el cálculo se han utilizado los archivos de clima que el programa de software Wufi Pro 5.3 posee

Ciudad española	Clasificación climática según DB-HE-1	Clasificación climática según Köppen-Geiger	*HDD 18°C *BizEE DD Tool
Málaga	A3	Csa	736
Palma de Mallorca	B3	Bsk	1103
A Coruña	C1	Csb	1585
Barcelona	C2	Bsh	1102
Madrid	D3	Cfa	1891

Tabla V.9: Zonas climáticas elegidas según archivos climáticos disponibles en el programa Wufi Pro 5.3

En cada una de estas clasificaciones climáticas, se realizó el análisis de la fachada ventilada, variando además el espesor del aislamiento, desde una fachada sin aislamiento hasta una con 15cm de espesor. La localización indicada con color rojo es la de A Coruña. Se hace para estudiar cual es el impacto del espesor de aislamiento térmico en función de la zona climática y su repercusión en el comportamiento higrotérmico.

Código	Clima utilizado	Codificación
FVG0S	Malaga	FVG0S-A3
	Palma de Mallorca	FVG0S-B3
	A Coruña	FVG0S
	Barcelona	FVG0S-C2
	Madrid	FVG0S-D3
FVG0C3	Malaga	FVG0C3-A3
	Palma de Mallorca	FVG0C3-B3
	A Coruña	FVG0C3
	Barcelona	FVG0C3-C2
	Madrid	FVG0C3-D3
FVG0C9	Malaga	FVG0C9-A3
	Palma de Mallorca	FVG0C9-B3
	A Coruña	FVG0C9
	Barcelona	FVG0C9-C2
	Madrid	FVG0C9-D3
FVG0C11	Malaga	FVG0C11-A3
	Palma de Mallorca	FVG0C11-B3
	A Coruña	FVG0C11
	Barcelona	FVG0C11-C2
	Madrid	FVG0C11-D3
FVG0C15	Malaga	FVG0C15-A3
	Palma de Mallorca	FVG0C15-B3
	A Coruña	FVG0C15
	Barcelona	FVG0C15-C2
	Madrid	FVG0C15-D3

Tabla V.10: Resumen de las simulaciones efectuadas según las zonas climáticas y espesores de aislamientos. En verde simulación de referencia

Los resultados mostrados se han organizado según:

- El contenido total de agua de cada cerramiento de diferente espesor del aislamiento, con variación en las localizaciones
- El contenido de agua en cada localización, con la variación de espesor de aislamiento en el cerramiento
- La transmitancia térmica valor-U en las localizaciones de Madrid D3 y A Coruña C1
- El contenido de agua en el granito y en la cámara de aire

El contenido total de agua en todas las localizaciones según tipo de espesor de aislamiento en el cerramiento.

Con los valores de estas primeras simulaciones realizadas se ha representado en gráficos los contenidos totales de agua en Kg/m² de todas las localizaciones, realizando un gráfico para cada tipo de espesor del aislamiento en la fachada ventilada.

En la situación del cerramiento sin aislamiento se deduce gráficamente que la exposición climática en la localización C1 A Coruña, tras la simulación, es la que mantiene mayor contenido total de agua en el cerramiento de todas. Es, con diferencia, la localización con mayor valor de contenido total de agua. Véase a continuación la figura V.24 donde el color rojo indica la clasificación climática de A Coruña.

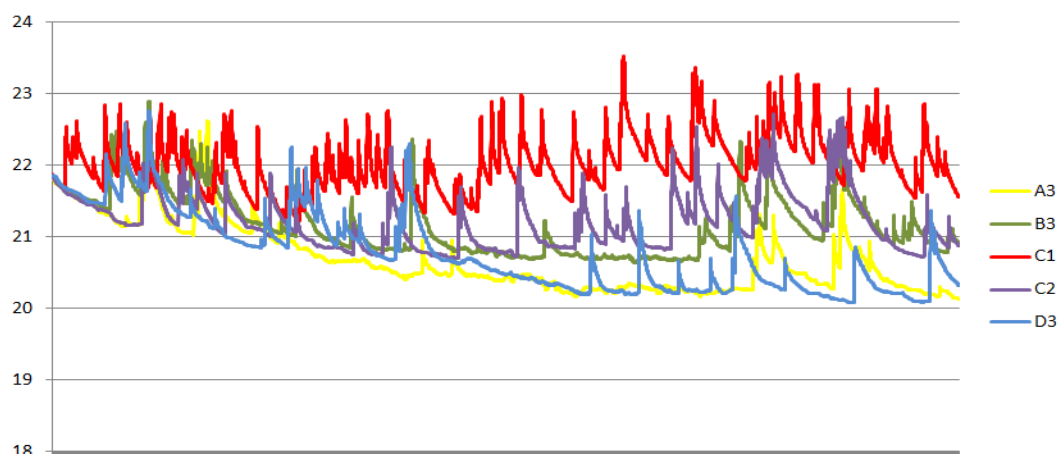


Figura V.24: Contenido total de agua en Kg/m² durante el año de simulación de todas las zonas climáticas para la condición del **cerramiento sin aislamiento FVG0S**

En el caso de la fachada ventilada con 3cm de espesor de aislamiento térmico, figura V.25, se observa que continua siendo la localización C1 A Coruña es la que más contenido de agua posee.

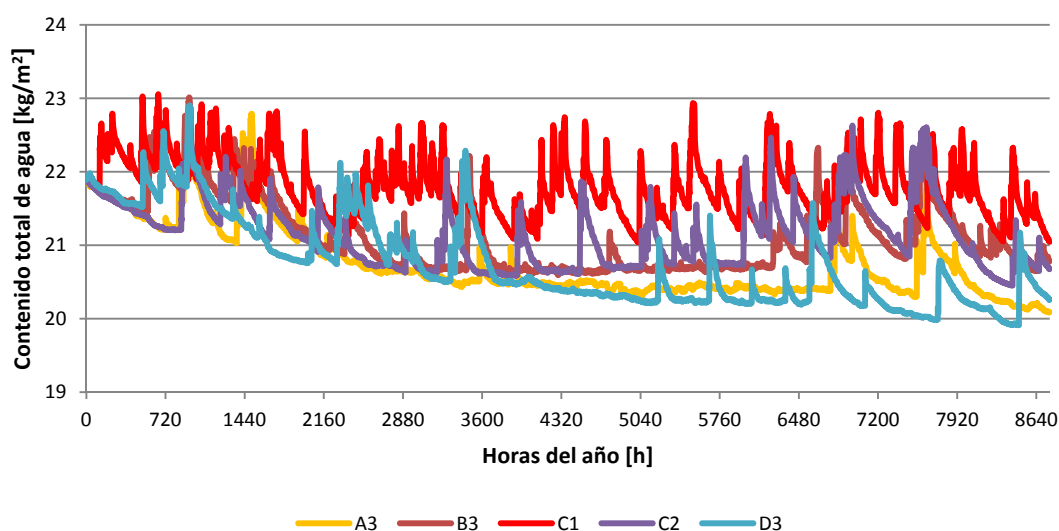


Figura V.25: Contenido total de agua en Kg/m² durante el año de simulación de todas las zonas climáticas para la condición del **cerramiento aislamiento de poliuretano de 3cm FVG0C3**

Es la localización de Madrid D3 es la que posee en el año menos contenido total de agua. Exceptuando el comportamiento de la localización C1 de A Coruña, el resto de las localizaciones poseen picos señalados de aumento de contenido total de agua.

En la fachada ventilada con aislamiento de 9cm, la tendencia de la localización C1 A Coruña de ser la que tiene más contenido total de agua, también se repite.

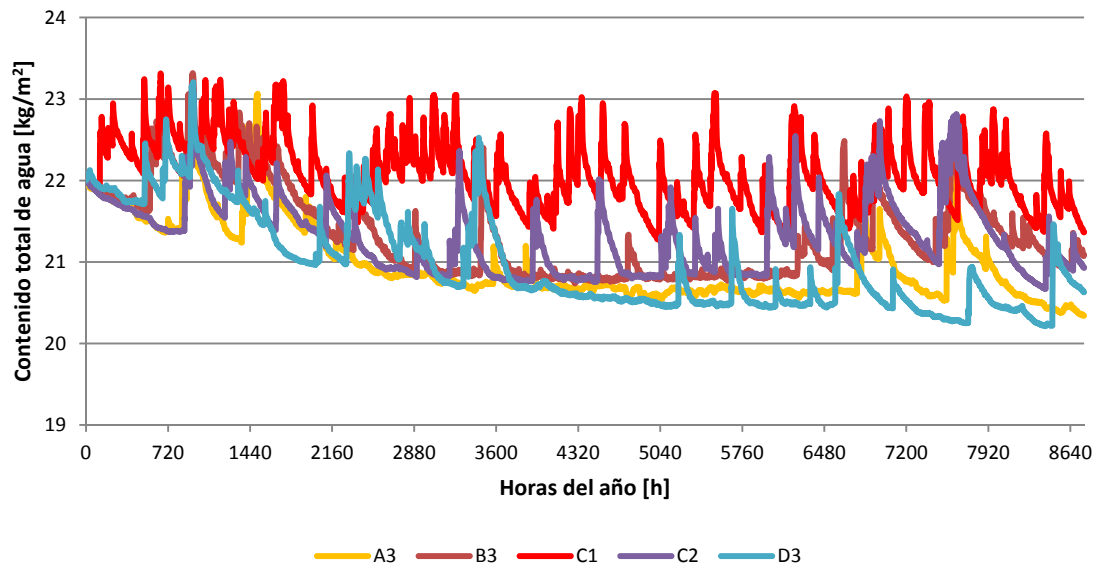


Figura V.26: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación de todas las zonas climáticas para la condición del **cerramiento aislamiento de poliuretano de 9cm FVG0C9**

A partir de 9cm y en el caso de 11cm la tendencia del contenido de agua, no parece variar, las gráficas parecen ser similares y las tendencias son las mismas.

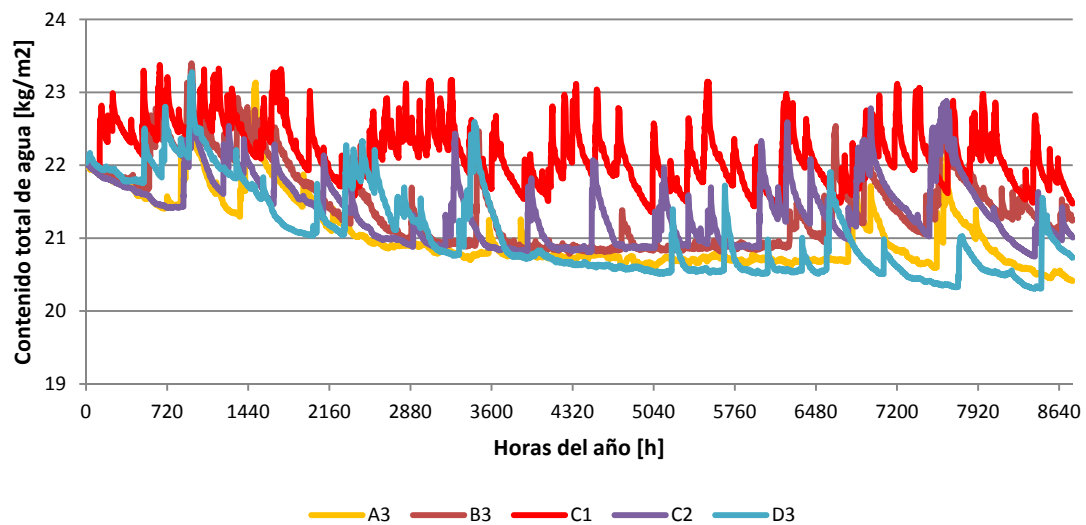


Figura V.27: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación de todas las zonas climáticas para la condición del **cerramiento aislamiento de poliuretano de 11cm FVG0C11**

La figura V.28 muestra el contenido total de agua del cerramiento de fachada ventilada con el espesor de aislamiento térmico de 15cm en todas las localizaciones. Se ve que la tendencia de la gráfica es la misma, sin embargo, los valores de contenido total de agua aumentan. Sigue la misma tendencia mostrada que en el caso del cerramiento sin aislamiento.

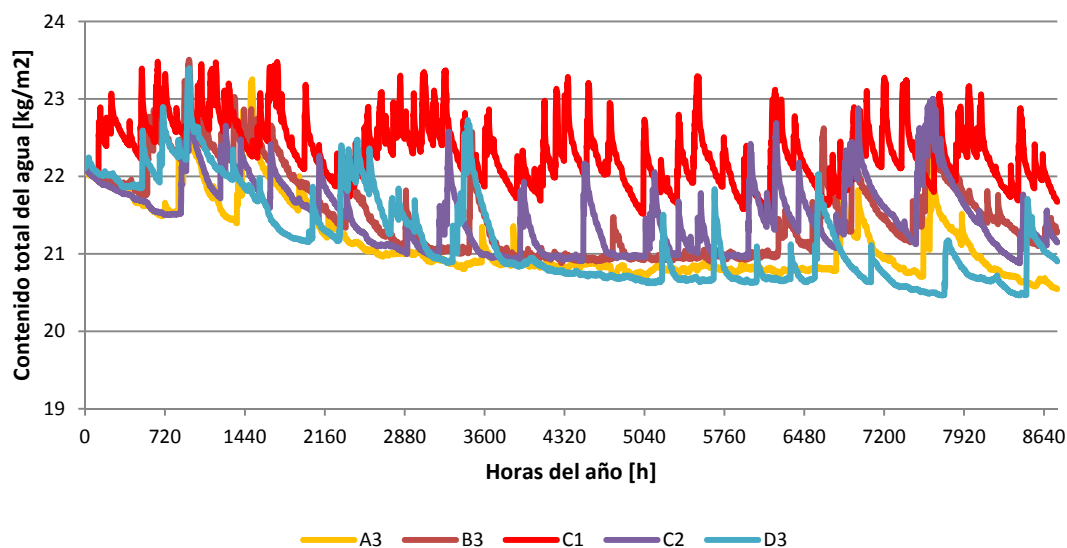


Figura V.28: Contenido total de agua en Kg/m² durante el año de simulación de todas las zonas climáticas para la condición del cerramiento aislamiento de poliuretano de 15cm FVG0C15

Se resume que el contenido total de agua en el cerramiento para la tipología de fachada ventilada en las diferentes localizaciones ha advertido que es la localización de A Coruña la que posee mayor contenido de agua anualmente. La localización de Madrid D3 es la que menos contenido de agua posee.

El contenido total de agua en cada localización según tipo de espesor de aislamiento

De los resultados de las simulaciones realizadas del contenido total de agua del cerramiento según las diferentes localizaciones, se puede observar que para la localización de Málaga A3, el cerramiento con el espesor de 15cm de aislamiento térmico de poliuretano, es el que más contenido de agua posee. Las diferencias entre los distintos tipos de cerramiento son más acusadas en el otoño.

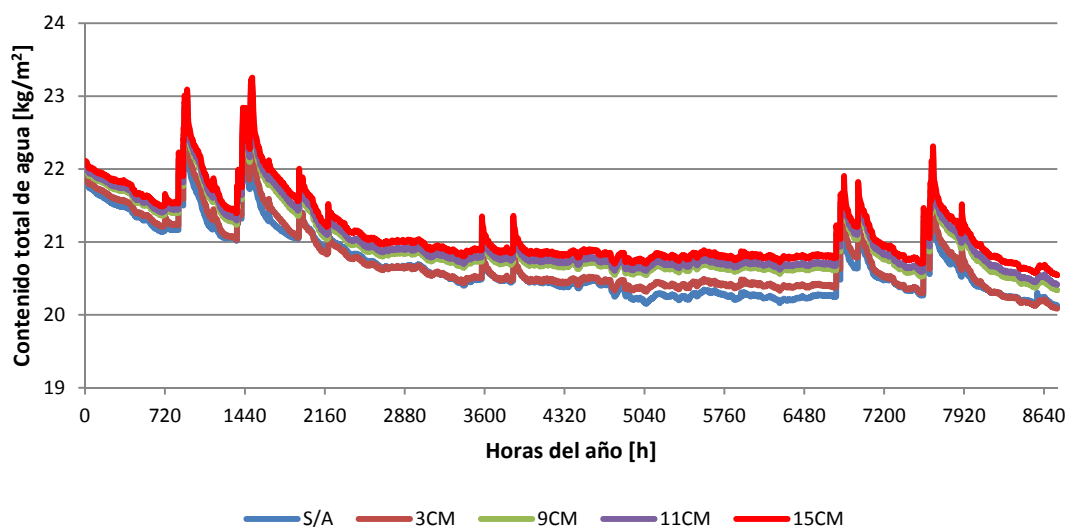


Figura V.29: Contenido total de agua en Kg/m² durante el año de simulación en la zona climática A3 Málaga para todas las condiciones de cerramiento.

Si vemos con detenimiento la figura de la localización de Palma de Mallorca B3, las diferencias de contenido de agua son menores entre tipos de cerramiento que en la anterior localización. Sin embargo, el tipo de cerramiento con espesor 15cm sigue manifestándose con mayor contenido de agua.

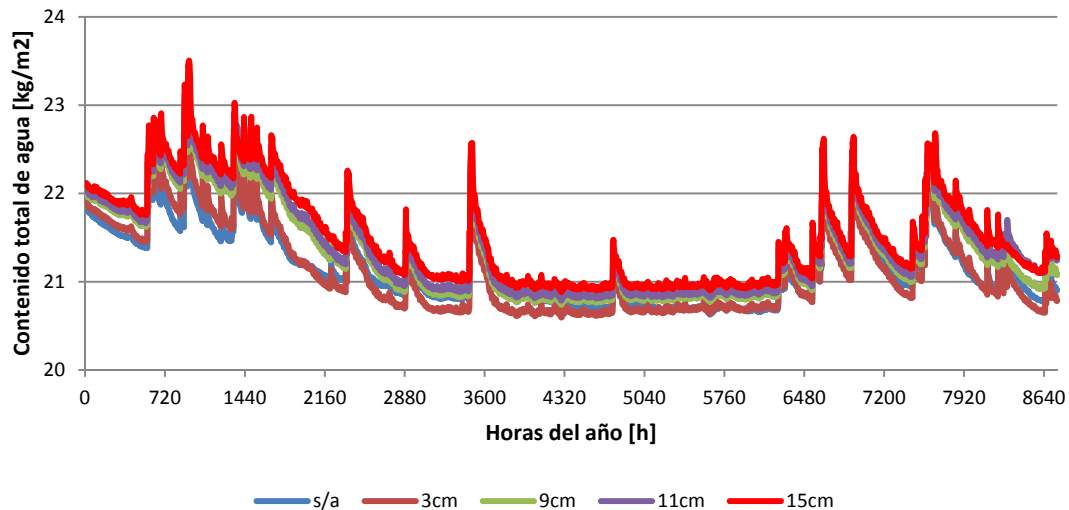


Figura V.30: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación en la zona climática B3 Palma de Mallorca para todas las condiciones de cerramiento.

La localización C1 de A Coruña muestra los valores de contenido de agua más altos, mantenidos a lo largo del tiempo. Es curioso también advertir que la condición del cerramiento sin aislamiento, en algunos momentos del otoño, supera al cerramiento con 15cm de poliuretano, aunque al principio sea el que menos contenido de agua posea.

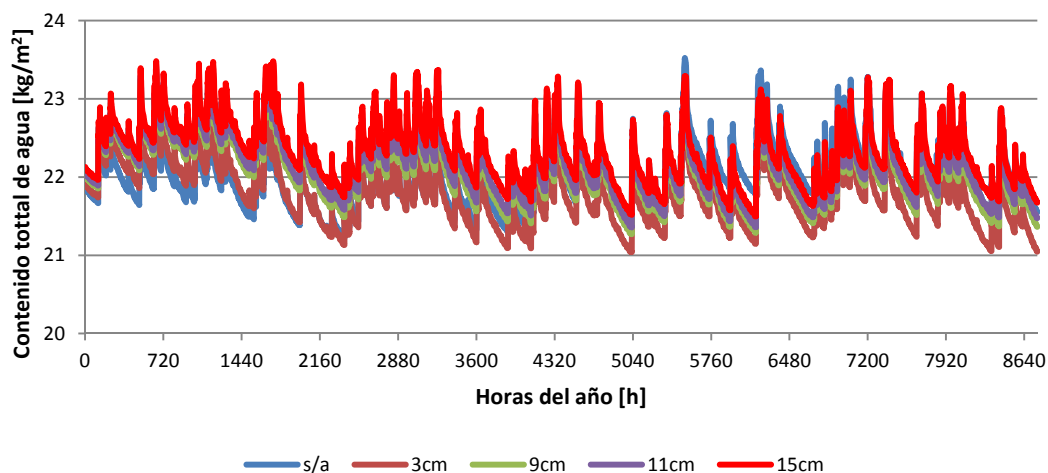


Figura V.31: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación en la zona climática C1 Coruña para todas las condiciones de cerramiento.

En la localización de C2 Barcelona, sigue el cerramiento de 15cm de poliuretano como el que posee más contenido de agua. Sin embargo, se advierte de menos picos de variaciones en el contenido de agua. El crecimiento de contenido de agua es proporcional al incremento de espesor del aislamiento.

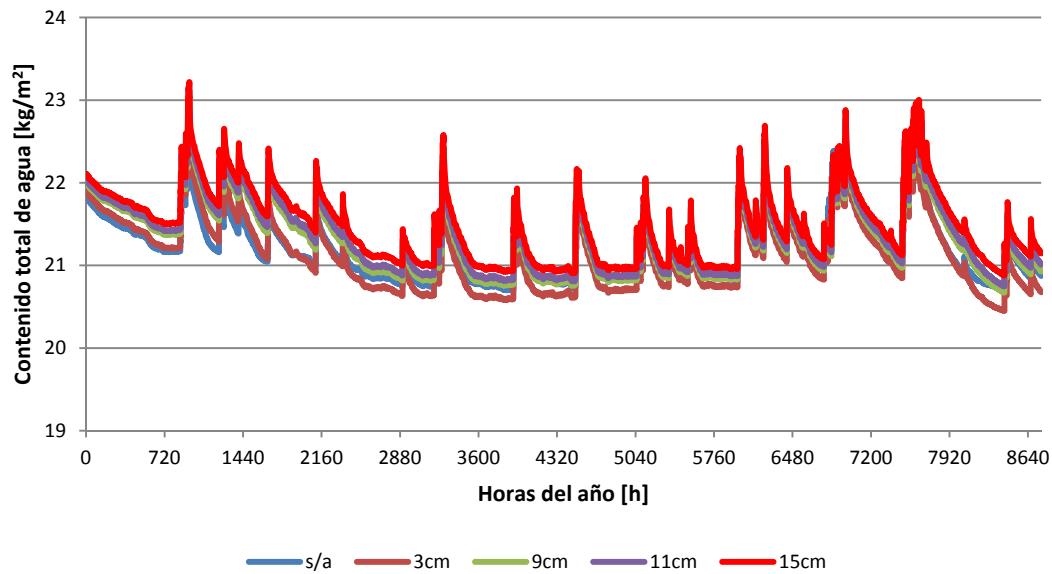


Figura V.32: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación en la zona climática C2 Barcelona para todas las condiciones de cerramiento.

La última localización D3 Madrid, es más similar a Palma de Mallorca donde hay periodos durante los cuales no hay grandes diferencias en el cambio de contenido de agua. Sigue teniendo el cerramiento con 15cm de poliuretano el mayor contenido de agua.

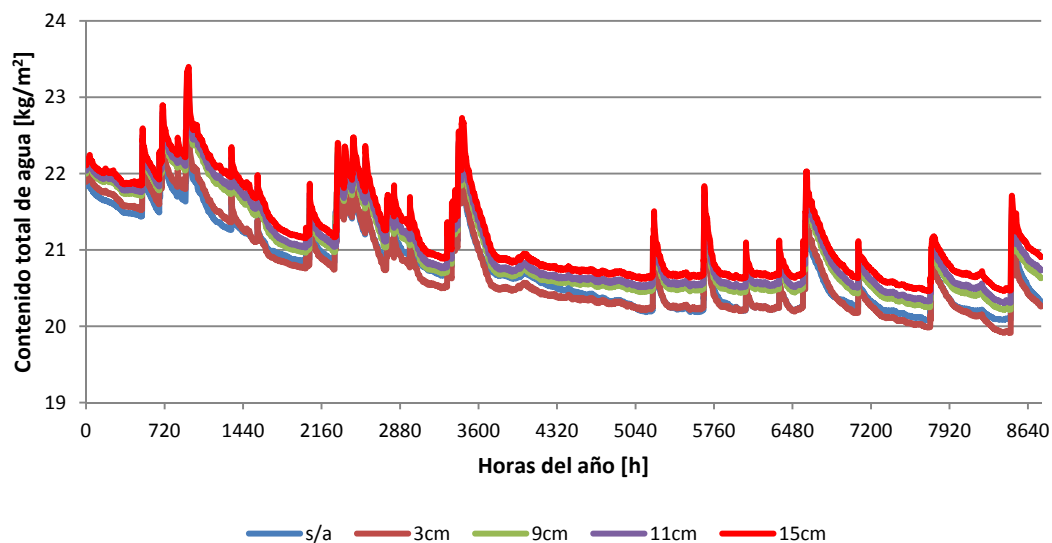


Figura V.33: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación en la zona climática D3 Madrid para todas las condiciones de cerramiento.

De esta primera parte se concluye que en todas las localizaciones el cerramiento de fachada ventilada con el espesor de 15cm de poliuretano es el que más contenido de agua posee. Destaca la localización de C1 A Coruña por la mayor y más cantidad de variabilidad en el tiempo de contenido de agua en ese cerramiento.

La transmitancia térmica mensual valor-U en las localizaciones de Madrid D3 y A Coruña C1

Con los resultados de las localizaciones obtenidas con mayor y menor contenido total de agua, se han extraído para el análisis los valores de transmitancia térmica. Se trata de conocer la variabilidad del clima que supone utilizando el mismo tipo de cerramiento.

Se ha considerado el espesor de aislamiento de 3cm del cerramiento control o real, se ha elegido colocar la localización con más contenido de agua C1 A Coruña y la que menos contenido de agua tiene el cerramiento D3 Madrid. Se extraen los valores de U transmitancia térmica durante el 1º año de simulación y durante el 5º años de simulación y se representan a continuación en una figura V.34.

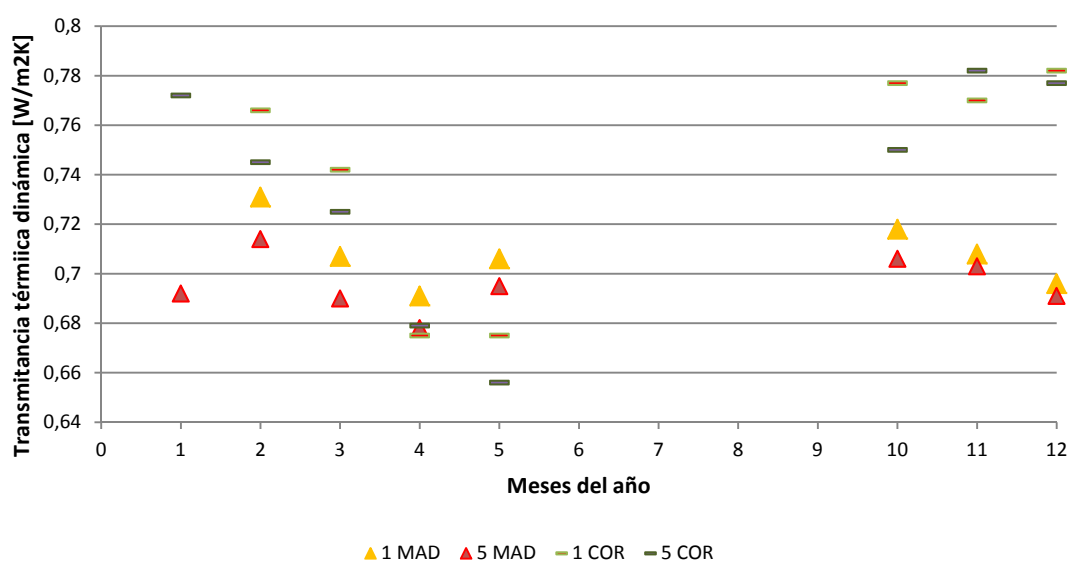


Figura V.34: Valores U de transmitancia térmica mensual del 1º año y del 5º año entre la zona climática con mayor capacidad de secado del cerramiento (Madrid) MAD y la que menos (A Coruña) COR para un espesor de aislamiento de poliuretano de 3cm.

Es curioso advertir que los meses de abril y mayo, las transmitancias térmicas dinámicas son menores en A Coruña que en Madrid. Sin embargo, el resto de los meses analizados, A Coruña tiene unos valores superiores a los de Madrid. Es decir, salvo abril y mayo, esta fachada ventilada se comportaría mejor en Madrid que en A Coruña, ya que tiene coeficientes de transmitancia térmica más bajos.

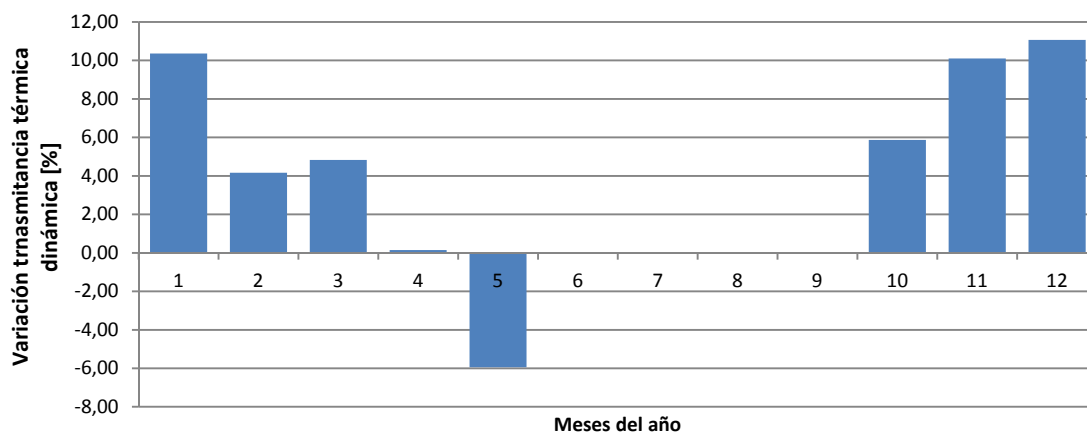


Figura V.35: Diferencia de valores U (W/m^2K) de transmitancia térmica mensual (decremento en positivo e incremento en negativo) en el 5º año entre la zona climática con menor capacidad de secado del cerramiento (A Coruña) y la que más (Madrid) para un espesor de aislamiento de poliuretano de 3cm.

La diferencia de valores U (W/m^2K) se han representado en la figura V.35. Se detecta, que durante tres meses del año tienen al menos una diferencia del 10% o más según la localización de la fachada.

Es también necesario conocer que pasa en el parámetro de la transmitancia térmica de la fachada ventilada de 3cm a lo largo del tiempo. Si representamos los valores obtenidos el 1º, 5º y 20º año, hay una tendencia a la reducción del valor en los casos analizados, exceptuando marzo, abril, noviembre y diciembre.

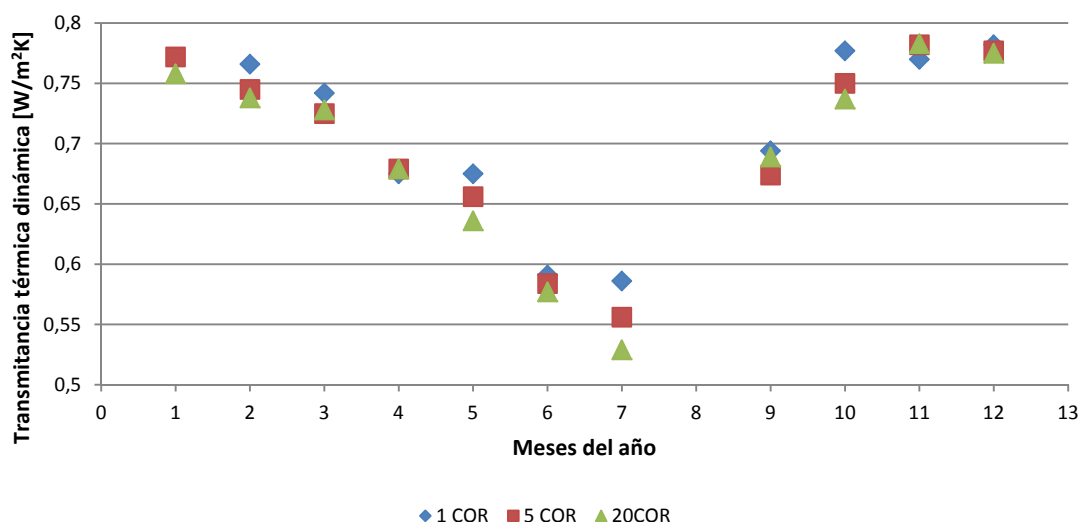


Figura V.36: Valores U (W/m^2K) de transmitancia térmica en el 1º, 5º y 20º año en la zona climática de A Coruña (C1) COR para un espesor de aislamiento de poliuretano de 3cm.

Se concluye que un mismo cerramiento puede poseer mejores prestaciones desde el punto de vista de la transmitancia térmica, dependiendo de la localización. Localizaciones con más agua y reflejadas en los distintos meses, poseerán peores comportamientos de transmitancia

térmica. Hay una tendencia a la reducción de los valores de la transmitancia térmica mensual a medida que van pasando los años.

El contenido de agua en los materiales según su localización

Sin embargo, no se sabe que está sucediendo en primera línea del cerramiento. A continuación se extraen los valores de contenido de agua del granito en todas las localizaciones durante los cinco años de simulación.

El granito

Se ha elegido la simulación del cerramiento con el espesor de poliuretano de 3cm. En él se visto que durante el primer año que es la localización de A Coruña C1, la que mantiene el contenido de agua más elevado en el granito. En el caso del último año la tendencia es muy similar. Las figuras no han advertido grandes cambios.

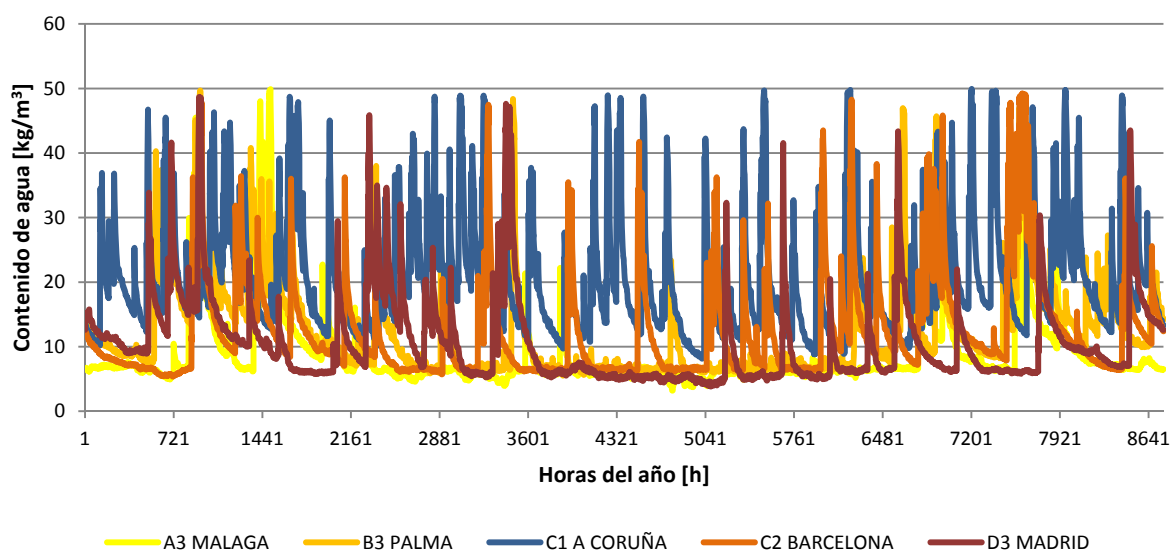


Figura V.37: Comportamiento del contenido de agua del granito en las distintas zonas climáticas para un espesor de aislamiento de poliuretano de 3cm durante el último año de simulación. Resultados Wufi Pro 5.3

Mirando con detalle en la figura anterior el segundo semestre del último año de simulación, se ve con claridad la mayor cantidad de agua existente en el granito, así como las grandes oscilaciones a las que está expuesto.

El contenido de agua de la cámara e=5cm en los distintas zonas climáticas

Siguiendo también la definición del cerramiento tipo, se realiza también un análisis del contenido de agua en la cámara de aire. Se puede observar de la figura V.38 que la localización C1 de A Coruña es con diferencia la que posee mayor contenido de agua en la cámara de aire.

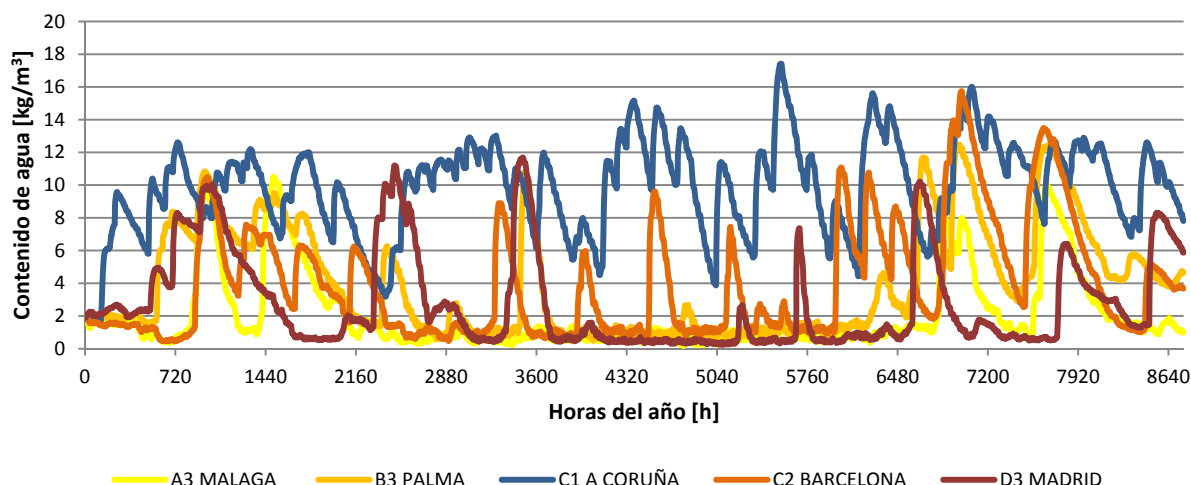


Figura V.38: Variación del contenido de agua Kg/m^2 en la cámara de espesor 5cm (poliuretano 3cm) durante el primer año según las zonas climáticas

En concreto, disponiendo los datos del contenido de agua en la cámara del primer año de simulación para el cerramiento con espesor de 3cm de poliuretano en las distintas zonas climáticas, es de advertir la gran cantidad de agua en el cerramiento de A Coruña C1 en comparación con cualquier otra localización.

Si se aumenta el espesor del aislamiento a 9cm, se puede observar que la tendencia es similar que la del cerramiento de 3cm pero con valores superiores de contenido de agua, e incluso mayormente más homogéneos que en el caso del cerramiento con 3cm de poliuretano.

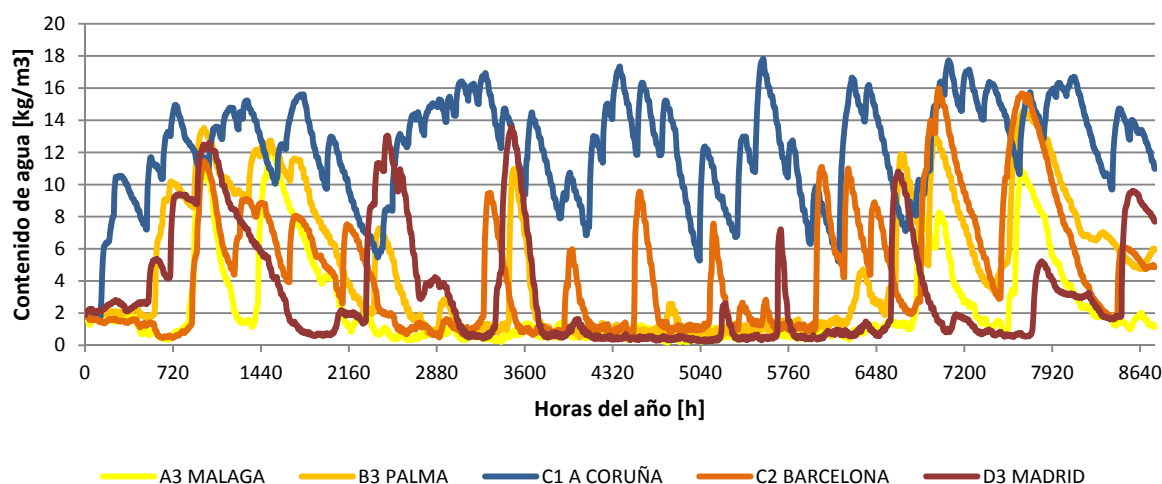


Figura V.39: Variación del contenido de agua Kg/m^2 en la cámara de espesor 5cm (poliuretano 9cm) durante el primer año según las zonas climáticas

Pero ¿qué estaría sucediendo en la misma localización con espesores de poliuretano diferentes? Si representamos gráficamente el contenido de agua de la cámara en la localización C1 A Coruña, es el cerramiento con mayor espesor el que tiene más contenido de agua. Esta diferencia es más destacable durante los seis primeros meses del año, así como el trimestre final de otoño, momentos de mayores precipitaciones.

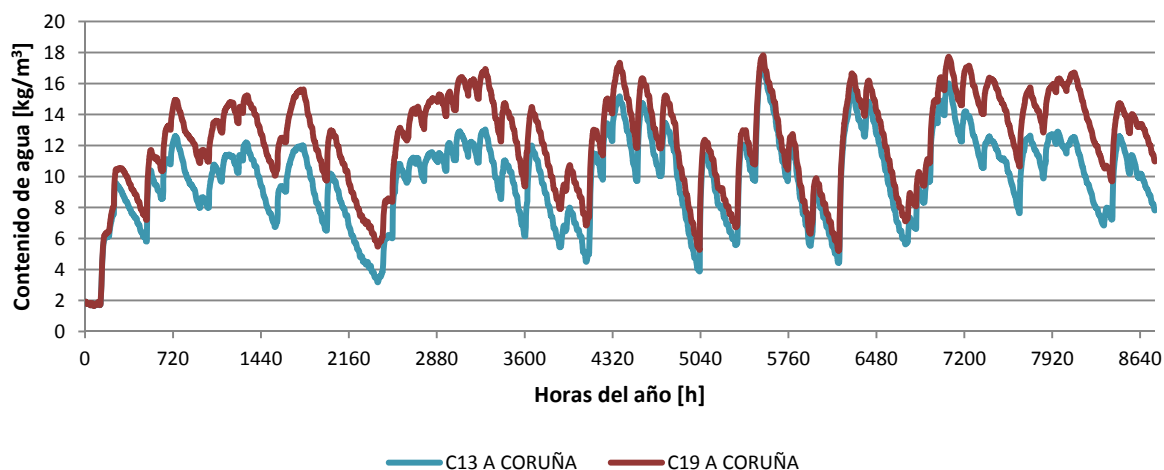


Figura V.40: Variación del contenido de agua Kg/m^2 en la cámara de espesor 5cm con aislamiento de poliuretano de 3cm y 9cm durante el primer año en la zona climática de A Coruña

En el caso de la localización D3 Madrid es la que menos contenido de agua en el cerramiento posee. Para las dos situaciones, con aislamiento de 3cm y de 9cm, se advierte que existe poca diferencia entre los dos valores, siendo la mayor diferencia en el primer trimestre del año, así como a finales del mismo, corroborándose la misma tendencia que en el caso de A Coruña.

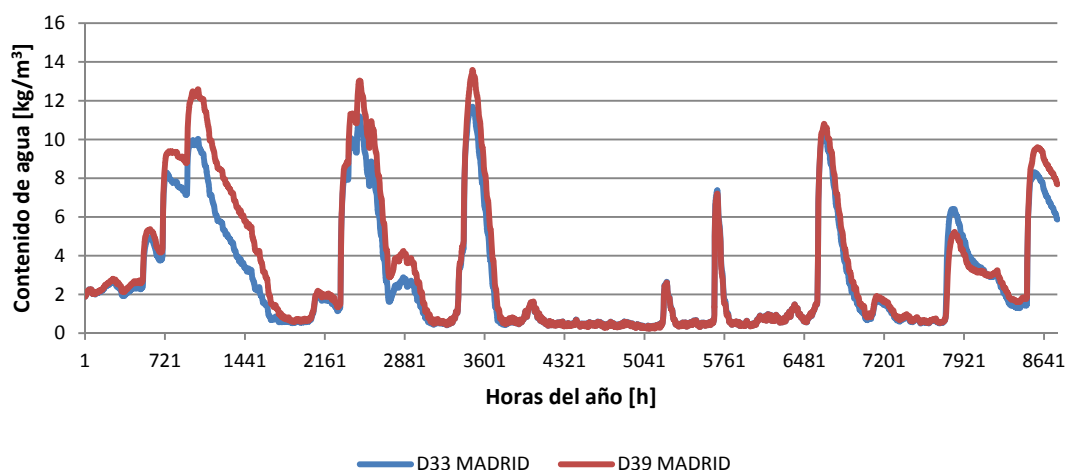


Figura V.41: Variación del contenido de agua Kg/m^2 en la cámara de espesor 5cm con aislamiento de poliuretano de 3cm y 9cm durante el primer año en la zona climática de Madrid

Se puede observar con claridad, que el incremento del contenido de agua en la cámara debido al incremento del espesor del poliuretano es menor que en la situación de Coruña.

V.2.2 INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN

Parámetros de orientación	Parámetros fijos 10-C3-F4			
	Inicio	Fin	Diferencia	
	Norte	21,9	19,4	-11,42%
	Sur	21,9	19,2	-11,42%
	Este	21,9	19,3	-11,42%
	Oeste	21,9	19,3	-11,42%

Tabla V.11: Simulaciones efectuadas según orientación de la fachada. Resultados de contenido total de agua en Kg/m^2 . Resultados Wufi Pro 5.3

El contenido total de agua según la orientación es prácticamente igual. Por los resultados obtenidos no se ha considerado destacable reportar.

Cabría la necesidad de asumir una modificación en la velocidad de la cámara, ya que la radiación solar es capaz de aumentar la velocidad del aire en la cámara y, por lo tanto, acelerar el proceso de secado. Véase el capítulo V.3 sobre las variaciones de velocidad de aire de la cámara

V.2.2 INFLUENCIA DE LA LLUVIA INCIDENTE

Para que en un cerramiento ingrese agua, debe conocerse claramente todas las fuentes que producen agua. La fuente mayor son las precipitaciones o caída de lluvia del clima en una localización determinada.

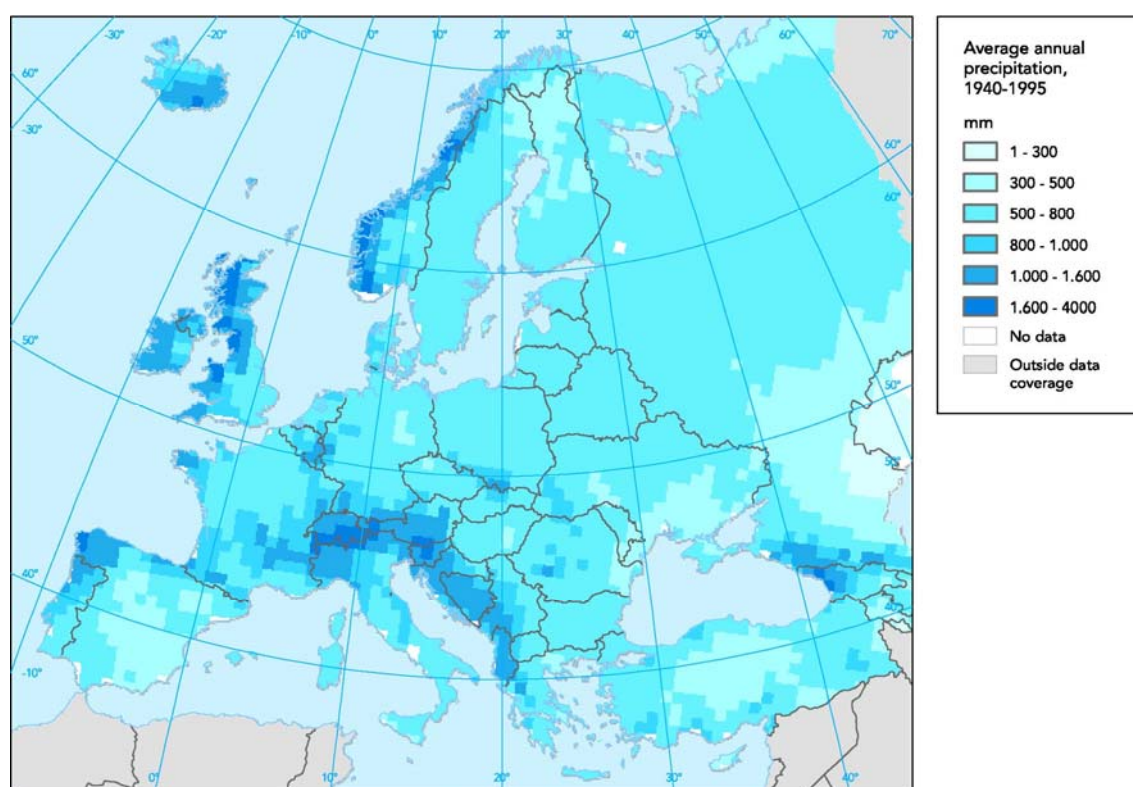


Figura V.42: Mapa de precipitaciones medias anuales en Europa. Agencia Europea Medioambiental (EEA). Fuente: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/average-annual-precipitation>

Pero no interesa saber exactamente la cantidad de agua que cae, sino la que es capaz de ingresar en el cerramiento vertical. Perez Bella, (2013) junto a otros muchos autores, indicaban que el parámetro de lluvia dirigida por el viento WDR (combinación de registros de precipitación y datos de velocidades de viento en el momento) y la acción simultánea con la presión del viento WDRP se correlacionan grandemente con la penetración de agua en fachadas de edificios. Estos parámetros característicos deberían ser considerados fundamentales en el diseño de los cerramientos con el fin de evitar la intrusión del agua al

interior. Estas siguientes simulaciones hacen los cálculo con estos parámetros y es motivo del análisis de sensibilidad.

La variación de lluvia incidente

Dada la importancia que supone la lluvia en el estudio hídrico de la fachada, se han utilizado en las simulaciones los dos **modelos de cuantificación de lluvia incidente** disponible en el programa WUFI Pro 5.3. Se han elegido los parámetros según el estudio de Sting Leal (2012) para cada uno de los métodos. Estos parámetros están expresados en la tabla V.12

1.A. Según modelo propio (WUFI Pro 5.3)

1.B. Según modelo de ASHRAE

WUFI Pro 5.3	$R_2=0,05$	$R_2=0,07$	$R_2=0,1$	$R_2=0,2$		
ASHRAE		$F_E=0,7$ $F_D=0,5$	$F_E=1,0$ $F_D=0,5$	$F_E=1,0$ $F_D=1,0$	$F_E=1,0$ $F_D=2,0$	$F_E=1,4$ $F_D=2,0$

Tabla V.12: Modelos y parámetros elegidos para la incorporación en el estudio de sensibilidad según Sting Leal (2012)

Orientación	Parámetros de lluvia incidente		Codificación
NORTE	WUFI	$R_2=0,05$	FVG. 01
		$R_2=0,07$	FVG. 02
		$R_2=0,1$	FVG. 03
		$R_2=0,2$	FVG. 04
	ASHRAE	$F_E=0,7; F_D=0,5$	FVG. 05
		$F_E=1,0; F_D=0,5$	FVG. 06
		$F_E=1,0; F_D=1,0$	FVG. 07
		$F_E=1,0; F_D=2,0$	FVG. 08
		$F_E=1,3; F_D=2,0$	FVG. 09
		$F_E=1,5; F_D=2,0$	FVG. 10

Tabla V.13: Simulaciones efectuadas en el programa WUFI Pro 5.3 variando parámetros de lluvia incidente

La tabla V.13 anterior muestra los diferentes parámetros que se han alterado para el análisis. Las simulaciones han tomado como cerramiento la fachada ventilada de 3cm de espesor de aislamiento térmico de poliuretano.

Resultados del análisis de sensibilidad de la lluvia incidente según modelo de ASHRAE

Contenido total de agua:

Realizadas las simulaciones variando la lluvia incidente según el modelo ASHRAE, Se observa un incremento continuado del contenido total de agua en el año de la monitorización, desde el inicio hasta el final de la misma. El agua que se condensa en el cerramiento debe ser capaz de secarse. Esta acumulación dará lugar a problemas futuros.

Parámetros de lluvia incidente	Parámetros fijos C3-C2-10	Inicio	Fin	Diferencia
	F1 ASHRAE $F_E=0,7$; $F_D=0,5$	21,9	18,8	-14,16%
	F2 ASHRAE $F_E=1,0$; $F_D=0,5$	21,9	19,0	-13,24%
	F3 ASHRAE $F_E=1,0$; $F_D=1,0$	21,9	19,2	-12,33%
	F4 ASHRAE $F_E=1,0$; $F_D=2,0$	21,9	19,3	-11,87%
	0 ASHRAE $F_E=1,4$; $F_D=2,0$	21,9	19,4	-11,42%

Tabla V.14: Resultados de contenido total de agua en Kg/m^2 del cerramiento al principio y final de los cinco años suponiendo diferentes condiciones de lluvia incidente. Resultados Wufi Pro 5.3

En la tabla V.14 se muestra la diferencia entre el valor del contenido total de agua inicial y el final. Se observa que, cuando los parámetros de la ASHRAE son mayores, el contenido final de agua se reduce menos. Esto es evidente, ya que a mayor lluvia incidente, más dificultad de secado del cerramiento.

Contenido de agua en el muro soporte de hormigón

En este apartado, se muestra el contenido de agua en la parte del muro soporte del cerramiento según la cantidad de lluvia incidente.

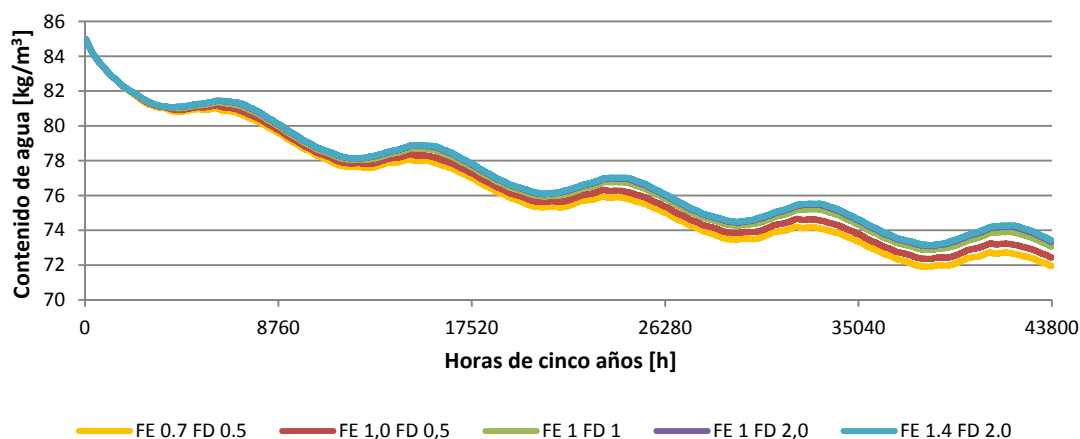


Figura V.43: Contenido de agua en Kg/m^3 en el muro de hormigón de la fachada ventilada durante los cinco años de simulación según diferentes cuantías lluvia incidente ASHRAE 160P. Resultados Wufi Pro 5.3

La figura V.43 muestra con claridad que, si bien, el contenido de agua inicial en todos los casos es el mismo, el supuesto de lluvia incidente $FE=1.4$ y $FD=2,0$ es el más desfavorable por lo que la reducción del contenido de agua es menor que en el resto de casos.

ASHRAE 160P	Contenido de agua inicial	Contenido de agua final
$FE=0.7$ y $FD=0.5$	85	71,93
$FE=1.0$ y $FD=0.5$	85	72,42
$FE=1.0$ y $FD=1.0$	85	73,05
$FE=1.0$ y $FD=2,0$	85	73,33
$FE=1.4$ y $FD=2,0$	85	73,41

Tabla V.15: Contenido de agua en Kg/m^3 al inicio y final de la simulación según parámetros de lluvia incidente. Resultados Wufi Pro 5.3

De ello se puede concluir que la lluvia incidente cuanto menor es, menos contenido de agua final tendrá el muro. Por el contrario, cuanto más lluvia incidente, la figura de contenido de agua será más tendida, lo que significa que el contenido de agua disminuye menos.

La transmitancia térmica según las diferentes cuantías de lluvia incidente modelo ASHRAE

Si analizamos los resultados de la simulación de transmitancia térmica mensual de los cinco años observamos como las diferentes cuantías de lluvia incidente incrementan el valor de transmitancia térmica, siendo los puntos de color azul los que supone la condición más desfavorable de lluvia incidente FE=1,40 FD=2,0

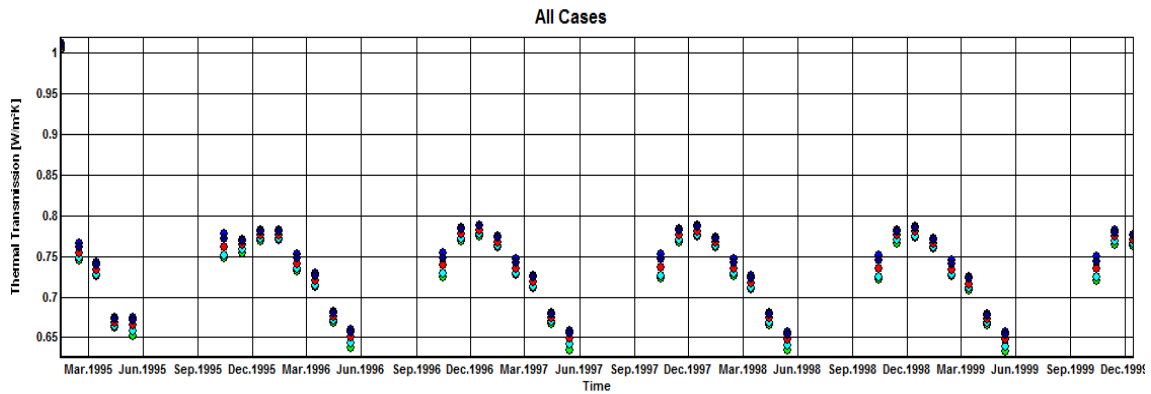


Figura V.44: Valores de transmitancia térmica dinámica, valor U, durante cinco años según diferentes cuantías de lluvia incidente ASHRAE 160P. Resultados Wufi Pro 5.3

Si representamos con más detalle el último año simulado, podemos advertir el incremento de transmitancia térmica es proporcional al incremento de cuantía de lluvia incidente.

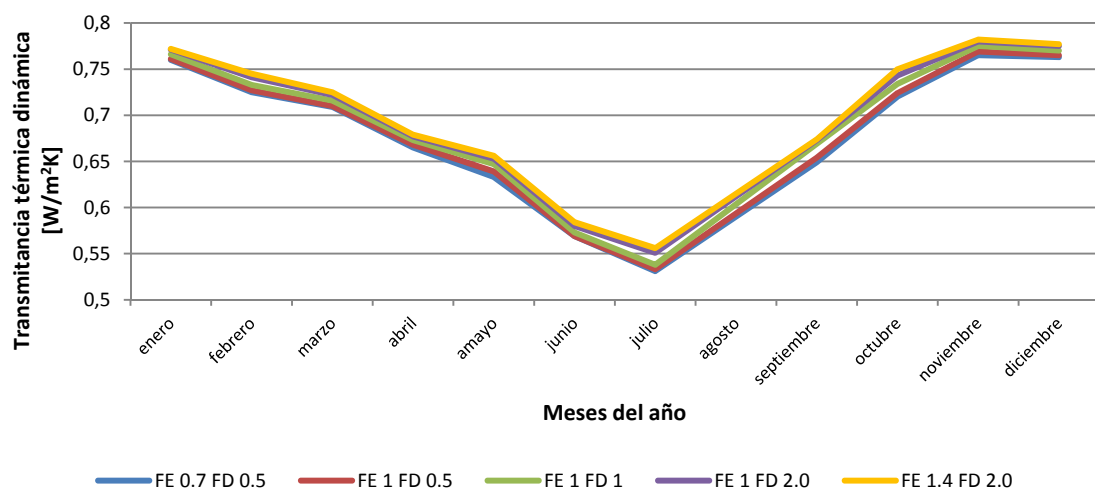


Figura V.45: Valor de transmitancia térmica mensual del último año de simulación de las diferentes condiciones de lluvia incidente según ASHRAE

Se observa que hay una correlación evidente entre la de lluvia incidente y la transmitancia térmica

Sin embargo, si analizamos la diferencia de valores de transmitancia térmica obtenida en el último año de simulación entre la condición de más lluvia incidente con la que menos lluvia incidente supone, se extrae que hay unas diferencias mensuales de valores que oscilan entre el 4,5 % y el 1,5%. Son los meses de julio a octubre los que mayor diferencia porcentual se obtienen. Véase la figura a continuación.

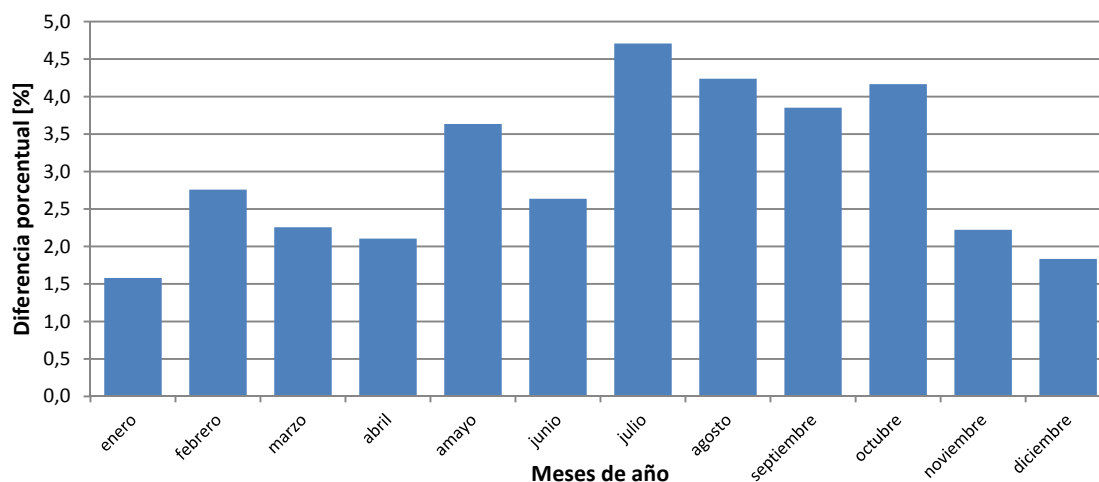


Figura V.46: Diferencia porcentual del valor de transmitancia térmica mensual valor- Y del último año de simulación de las diferentes condiciones de lluvia incidente según ASHRAE

V.2.4 INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL EN EL FLUJO DE CALOR

Una de las argumentaciones más importantes de este trabajo es la contribución del agua y/o humedad en el comportamiento de la densidad de tasa del flujo de calor en el cerramiento. Para cuantificar esta contribución se han realizado simulaciones que reflejan la densidad de tasa del flujo de calor que existe debido a la conducción del calor a través del cerramiento. En la simulación también se ha colocado otro sensor para tomar datos de la densidad de tasa del flujo de calor latente, es decir, el correspondiente a la energía aportada por los cambios de estado dentro del cerramiento. Este procedimiento es el mismo que el utilizado en el caso de la monitorización *in situ*. Ver capítulo III

A continuación se exponen los resultados de realizar la simulación según los sensores dispuestos. Los sensores reflejados en el interior y definidos en el esquema como hfsi son los sensores del lado caliente. El sensor definido como hfse es el sensor definido como sensor del lado frío.

La figura V.47 muestra la densidad de tasa de flujo de calor recogido en esas dos posiciones. En color azul y con línea de tendencia se muestra la posición del lado frío, donde sólo se tiene en consideración el calor por conducción. La línea roja refleja la densidad de tasa de flujo de calor en la cara interior o caliente. Esta posición es la que recoge todos los tipos de flujo de calor, por conducción, por transporte de agua líquida por capilaridad, por la difusión del vapor de agua y por la desorción del agua durante el proceso de secado. En este caso, sólo el flujo de calor por conducción y el calor latente son de valor suficiente.

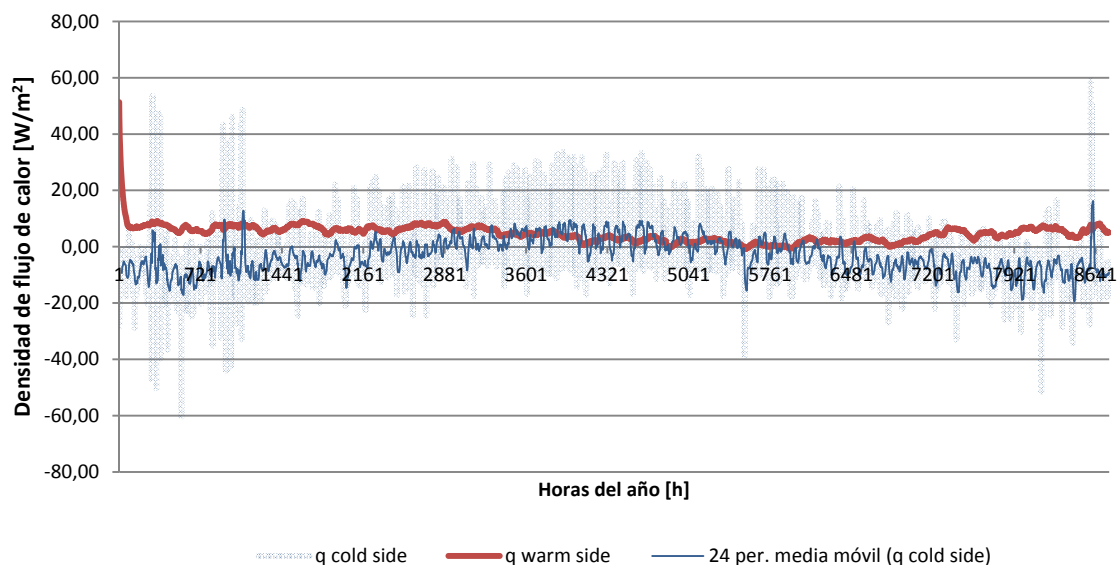


Figura V.47: Densidad de tasa de flujo de calor en W/m^2 en el lado frío-sup ext (azul) y en el lado caliente (rojo) del cerramiento de fachada ventilada de granito en A Coruña durante un año de simulación con la herramienta Wufi Pro 5.3

Si se representa anualmente la diferencia de densidad de tasa de flujos de calor entre el lado frío y el lado caliente obteniendo la densidad de tasa de flujo de calor latente y se pone en comparación con la densidad de tasa de flujo de masa de humedad, se observa que la tendencia de la curva es similar, siendo en verano diferencias de flujo de calor casi nulas, así como la densidad de tasa de flujo de masa de humedad. En contraposición son los meses de invierno, en la figura representada al principio (enero y febrero) y al final del año (noviembre y diciembre) donde se refleja la diferencia de la densidad de tasa de flujo de calor más positiva y de mayor valor, así como la densidad de tasa de flujo de masa de humedad.

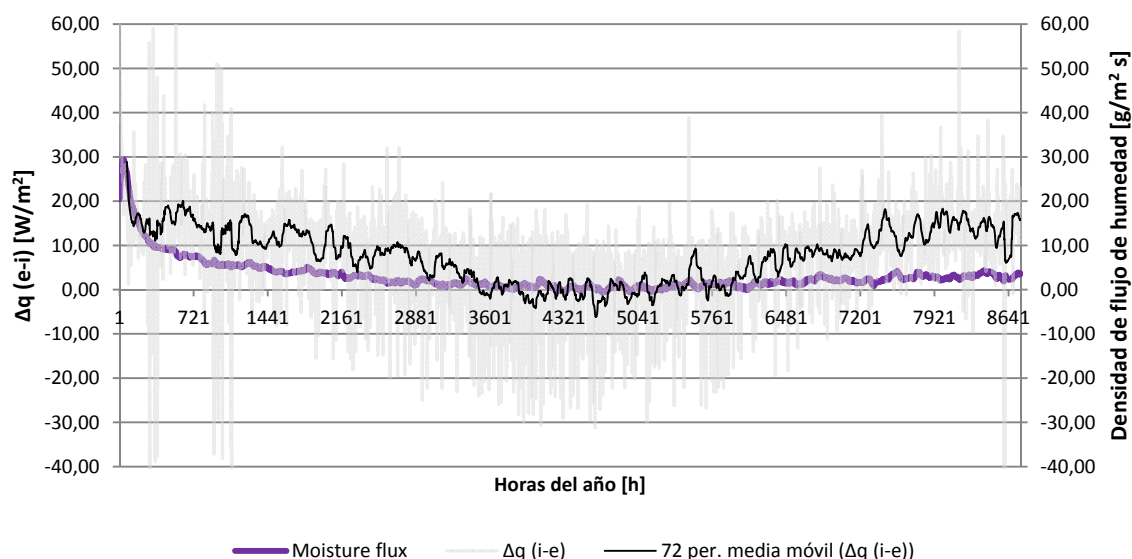


Figura V.48: Diferencia de densidad de flujo de calor en W/m^2 entre el lado frío sup-ext y el caliente y densidad de flujo de masa de humedad en $\text{g/m}^2 \text{s}$ del año de monitorización del cerramiento de fachada ventilada de granito en A Coruña con la herramienta Wufi Pro 5.3

Si se representa la simulación durante cinco años, la figura muestra que la tendencia anual se repite durante esos cinco años. En los meses de verano, el flujo de calor tiende a 0, por el contrario el flujo del interior en el resto de los meses es positivo y el flujo de calor exterior es negativo. Esto puede observarse en la figura V.49.

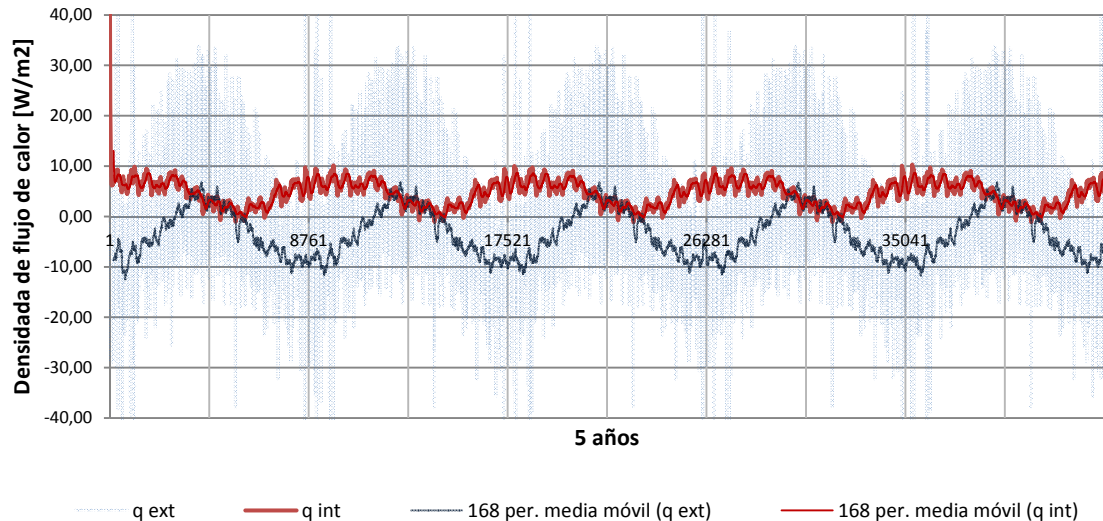


Figura V.49: Densidad de tasa de flujo de calor en W/m^2 en el lado exterior (azul-negro) y en el lado caliente (rojo) del cerramiento de fachada ventilada de granito en A Coruña durante cinco años de simulación con la herramienta Wufi Pro 5.3. Opción con calor latente.

Representando la diferencia de los flujos de calor entre el exterior y el interior, quedando por tanto el calor latente, y comparándola con la curva de la densidad de flujo de masa de humedad durante los cinco años de simulación se observa la misma tendencia repetida a lo largo de los cinco años que a lo largo de un año. En el verano, la densidad de flujo de masa de humedad es casi 0, así como el flujo de calor. Por el contrario son los meses de invierno y lluviosos los que marcan los valores más altos.

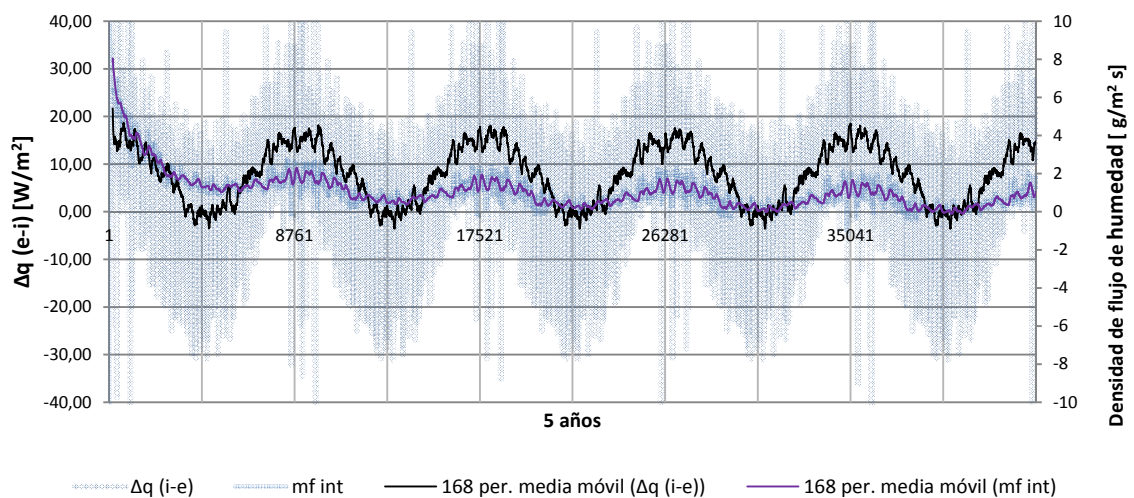


Figura V.50: Diferencia de densidad de tasa de flujo de calor en W/m^2 del lado caliente (rosa-rojo) y densidad de flujo de masa de humedad (azul) en $\text{g/m}^2 \text{ s}$ durante cinco años de monitorización del cerramiento de fachada ventilada de granito en A Coruña con la herramienta Wufi Pro 5.3. Opción con calor latente

Se concluye que el calor latente es de relevancia durante los meses que existe más humedad y/o lluvia. Por el contrario, es en el verano donde apenas existe este tipo de densidad de tasas de flujo de calor. Los valores de flujo de calor latente y el flujo de masa de humedad tienen tendencias y comportamientos similares, correlacionándose los dos comportamientos.

V.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LOS MATERIALES COMPONENTES

V.3.1 INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL AISLAMIENTO TÉRMICO

De los estudios recogidos en el capítulo II, se evidenciaba una variación del valor de transmitancia térmica en los cerramientos y en particular en la fachada ventilada, entre el valor de la transmitancia térmica teórica-cálculo (U_T) y la transmitancia térmica real, obtenida de medidas in-situ (U_R).

Con esta documentación recogida, en el capítulo III se planteaba la **primera hipótesis**. Esta hipótesis cuestionaba si en el sistema constructivo de fachada ventilada analizada existía una desviación entre el valor de transmitancia térmica de cálculo (U_T) y la obtenida in-situ (U_R).

Para verificar esta hipótesis, además de realizar la monitorización in-situ explicada con detalle en el anterior capítulo, se realizaron simulaciones tomando como base la misma fachada monitorizada.

Para corroborar esta hipótesis, se sometió a un análisis de sensibilidad un modelo de fachada ventilada de granito y con diferentes espesores de aislamiento térmico. Se suponen siete condiciones. Una situación inicial de fachada ventilada sin aislamiento. Una segunda situación de fachada ventilada con 3cm de espesor de aislamiento de poliuretano, el tipo que más se ha utilizado en la construcción con la normativa nacional CT-79, que está ejecutado, y que se ha monitorizado para comparar con estos resultados simulados.

Clima	Orientación	Acabado ext.	Muro	Acabado int.	Aislamiento	Código
C1 Coruña	Norte	Granito	Hormigón	Yeso	Sin aislamiento	FVG0S
					3cm poliuretano	FVG0C3
					5 cm poliuretano	FVG0C5
					9 cm poliuretano	FVG0C9
					11 cm poliuretano	FVG0C11
					15 cm poliuretano	FVG0C15
					30 cm poliuretano	FVG0C30

Tabla V.16: Simulaciones de Fachada Ventilada de Granito con variaciones según el espesor del aislamiento térmico

Una tercera condición con un espesor de 5cm de poliuretano, espesor que cumplía las prestaciones térmicas del C.T.E. (DB HE-1) en el 2006. Una cuarta condición de 9 cm de espesor para cumplir las prestaciones del Código Técnico español exigidas en el CTE (DB HE-1) desde el año 2013 a los muros de fachada en la zona climática C1 e indicadas en la tabla V.16. Una cuarta condición de un espesor de 11cm para cumplir el valor mínimo U en todas las zonas climáticas del territorio español. Finalmente se ha realizado también una simulación de 15cm y 30cm de espesor de poliuretano, espesores de aislamiento comunes en países nórdicos europeos.

Como se observa, si bien se ha realizado esta simulación para A Coruña, zona climática C1, no todos los lugares tienen las mismas exigencias de valor máximo U, tal y como se puede apreciar en la tabla V.17.

Zona Climática	Valor U Muros límite según DB HE-1 (2013)
A3	0,50 W/m ² K
B3	0,38 W/m ² K
C1	0,29 W/m ² K
C2	0,29 W/m ² K
D3	0,27 W/m ² K
E	0,25 W/m ² K

Tabla V.17: Valores U transmitancia térmica (W/m²K) límite según zona climática definida en CTE DB HE-1 (2013)

Estos requerimientos de U límite indicados en la tabla V.14 fueron modificados en España recientemente, concretamente en el año 2013 para dar respuesta a la transposición de la directiva europea. Los valores anteriores eran menos exigentes y variaban entre U=0,66 W/m²K, U=0,73 W/m²K y U=0,82 W/m²K, C.T.E DB HE-1 2006.

Realizadas las simulaciones, a continuación se exponen los resultados obtenidos.

El contenido total de agua en el cerramiento de las simulaciones realizadas

Para cada cerramiento se evalúa la humedad inicial y la humedad final tras un periodo de cinco años. El resultado indica la capacidad del cerramiento para secar a lo largo del tiempo. Si el valor final de la simulación es menor que el valor inicial, significa que el cerramiento tiene el potencial de secarse. En el caso que nos ocupa se han realizado simulaciones de cinco años y se han extraído los siguientes resultados de contenido total de agua.

Parámetros de espesor de aislamiento de poliuretano	Parámetros fijos 0-10-Norte	Inicio	Fin	Diferencia
	Sin aislamiento	21,8	21,2	-2,75%
	C3 Aislamiento 3cm de poliuretano	21,9	19,4	-11,42%
	C5 Aislamiento 5cm de poliuretano	21,9	19,3	-11,87%
	C9 Aislamiento 9cm de poliuretano	22,0	19,4	-11,81%
	C11 Aislamiento 11cm de poliuretano	22,0	19,5	-11,36%
	C15 Aislamiento 15cm de poliuretano	22,1	19,8	-10,41%
	C30 Aislamiento 30cm de poliuretano	22,4	20,6	-8,04%

Tabla V.18: Resumen del contenido total de agua en Kg/m² según las simulaciones realizadas. Resultados Wufi Pro

5.3

De la tabla V.18 se deduce que, todas las simulaciones de cerramiento con espesores de aislamiento diferentes poseen el potencial de secarse, ya que el contenido total de agua al final de la simulación siempre es menor. Las disminuciones, cuando existe aislamiento, oscilan entre y 8% y un 12%. En el caso del cerramiento sin aislamiento esta diferencia es más baja, sólo del 2,75%.

Si representamos valores del contenido total de agua Kg/m² obtenidos durante cinco años y se representan en una gráfica se obtiene de forma visual la variación hídrica de cada supuesto analizado.

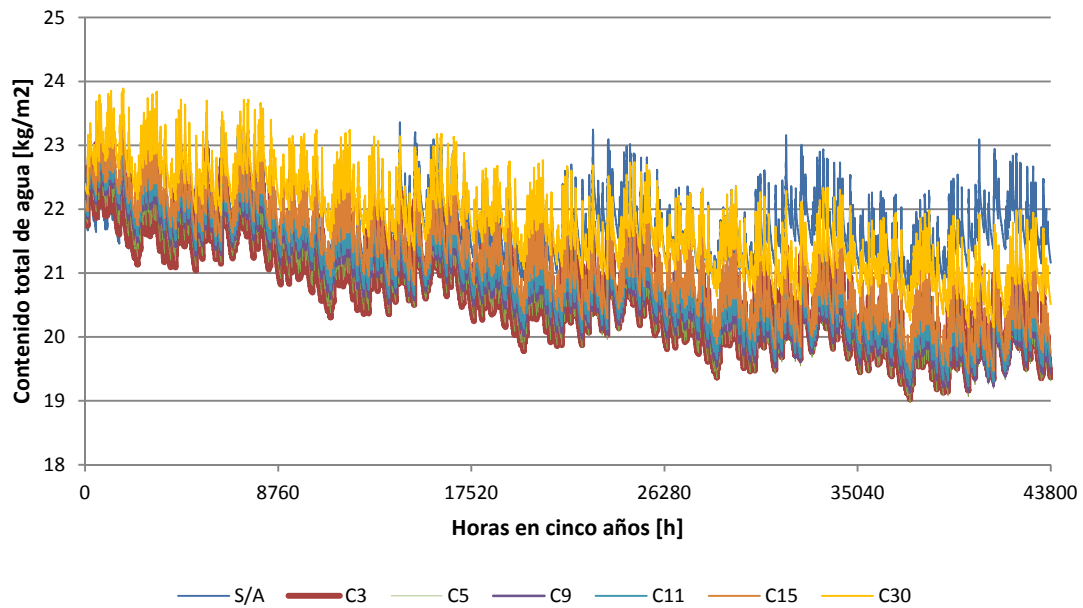


Figura V.51: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante los cinco años en todas las simulaciones con distintos espesores de aislamiento de poliuretano. Resultados Wufi Pro 5.3

Al término de los cinco años, el cerramiento sin aislamiento es el que tiene una humedad más alta. Esto corrobora los datos de la tabla anterior, que indican que la reducción de valor del contenido total de agua es la menor, solamente un 2,75%. Tras el cerramiento con aislamiento, es curiosamente el cerramiento con 30cm de espesor el que se advierte como el segundo cerramiento que menos ha reducido el contenido total de agua.

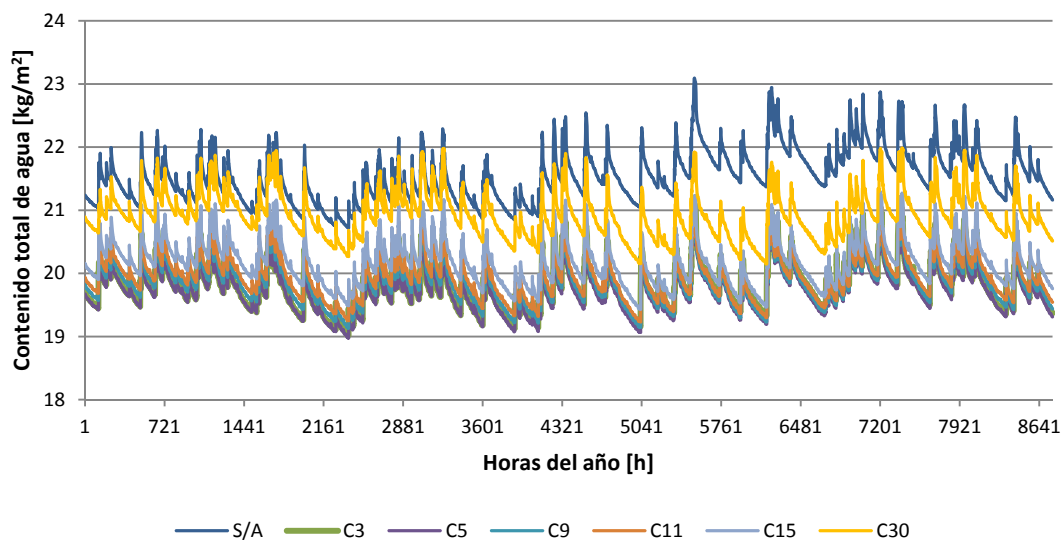


Figura V.52: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el último año en todas las simulaciones con distintos espesores de aislamiento de poliuretano. Resultados Wufi Pro 5.3

Si se observa la tendencia del contenido total de agua del cerramiento en el último año en la figura V.52, se advierte que todas las curvas que representan algún cerramiento con aislamiento son iguales pero con comportamientos desplazados. Sólo se ha advertido un comportamiento diferencial en el caso del cerramiento sin aislamiento.

Se puede resumir que el contenido total de agua al inicio de la simulación en todos los casos analizados siempre se reduce al final de los años simulados. En el caso de 9cm de aislamiento, es el espesor con mayor reducción al final de la simulación. Por el contrario, es el cerramiento de fachada ventilada sin aislamiento el que posee una menor reducción, tan sólo un 2,75%.

El contenido de agua en la cámara de aire

Si se analiza el contenido de agua de la cámara de aire de 5cm en las siete simulaciones realizadas, se observa que durante los cinco años, si bien se parte del mismo contenido de agua inicial en la cámara, el cerramiento con mayor espesor de aislamiento ($e=30\text{cm}$), representado con color amarillo en la figura V.53, es el cerramiento que tiene un contenido de agua mayor en la cámara.

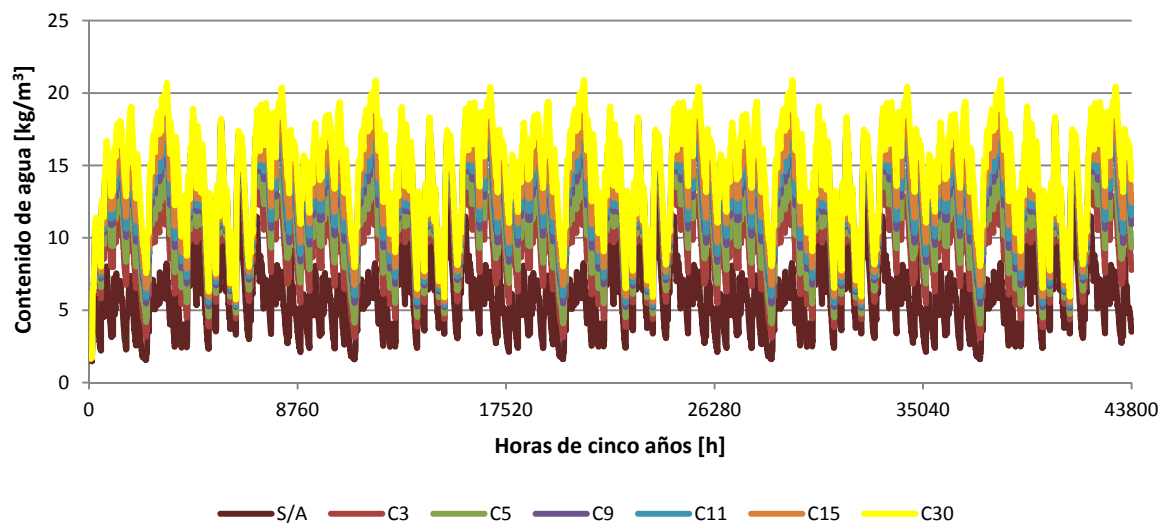


Figura. V.53: Contenido de agua en Kg/m^3 en la cámara de aire durante los cinco años en todas las simulaciones con distintos espesores de poliuretano. Resultados Wufi Pro 5.3

Si se extrae el último año de simulación, se observa que las curvas son similares pero con mayor variabilidad, siendo las de mayor variabilidad, es decir más valor de contenido de agua, las que poseen mayor espesor de aislamiento. Es en el caso del cerramiento sin aislamiento, el contenido de agua de la cámara de aire que es el menor, tal y como se observa en la figura que abajo se muestra.

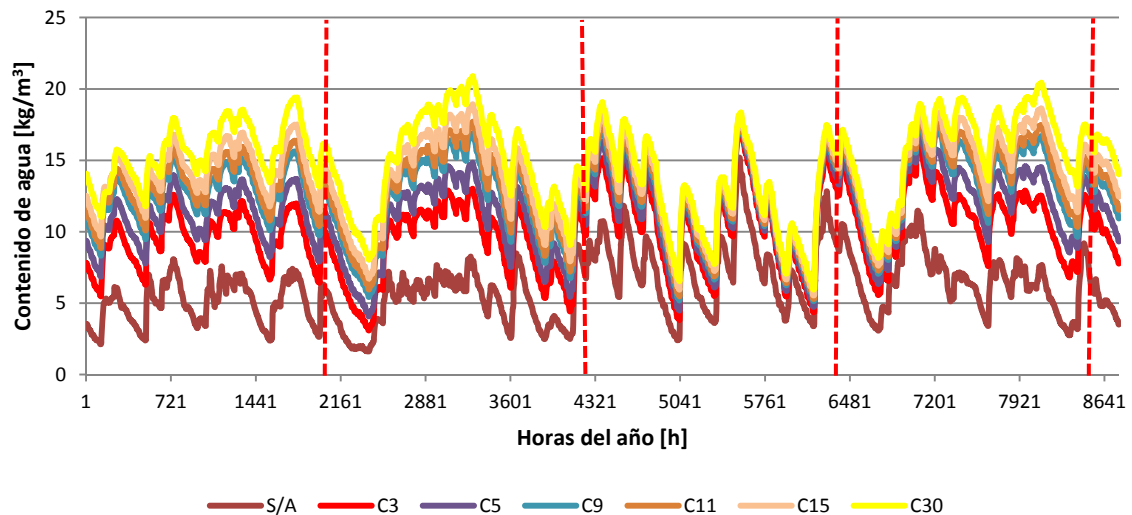


Figura V.54: Contenido de agua en Kg/m^3 en la cámara de aire durante el último año de simulación con distintos espesores de poliuretano. Resultados Wufi Pro 5.3

En esta figura V.54, se han representado unas líneas discontinuas rojas que dividen el año en cuatro trimestres. Es apreciable cómo en los meses más secos, julio, agosto y septiembre, las gráficas de humedad de los cerramientos se acercan, en tanto que en los meses lluviosos se hace más acusada su separación.

Se puede resumir que el cerramiento con el espesor de 30cm es el que produce un contenido de agua en la cámara de aire mayor que en el resto de simulaciones realizadas.

Contenido de agua en el poliuretano

En este caso los resultados obtenidos en el contenido de agua en el poliuretano son representados en la figura V.55

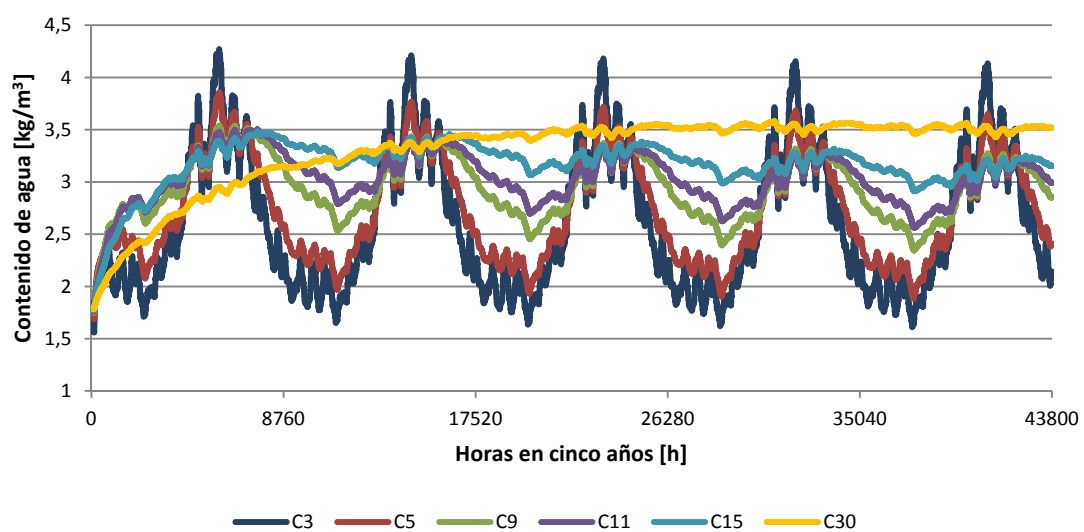


Figura V.55: Contenido de agua en Kg/m^3 en el poliuretano durante los cinco años en todas las simulaciones con distintos espesores de aislamiento de poliuretano. Resultados Wufi Pro 5.3

Las figuras corroboran un comportamiento húmedico esperable: el de menos espesor (3cm) es el de humedad menos acusada y más inestables. Conforme el poliuretano va aumentando de espesor, también aumenta la humedad y la gráfica presenta menos picos. Finalmente el aislamiento de mayor espesor (30 cm) culmina la tendencia con la gráfica de la humedad más alta y uniforme.

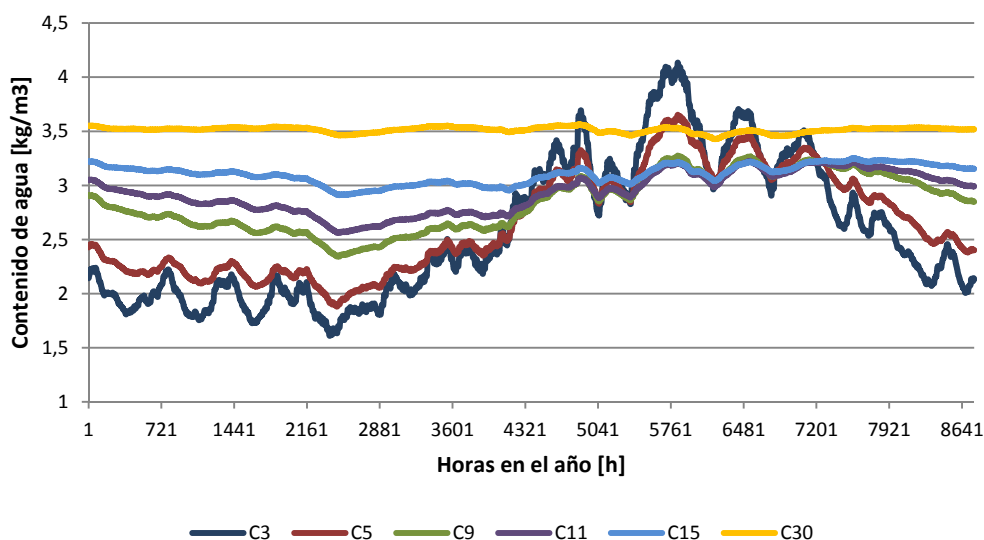


Figura V.56: Contenido de agua en Kg/m³ en el poliuretano durante el último año en la simulaciones con distintos espesores de aislamiento de poliuretano. Resultados Wufi Pro 5.3

Es de destacar en esta figura V.56 que los espesores de aislamiento más pequeños, 3 y 5cm, tienen una curva oscilatoria sinusoidal de su contenido de agua, con amplitudes entre 2 y 4 Kg/m³ aproximadamente. A medida que va aumentando el espesor del aislamiento se observa como su comportamiento de contenido de agua va disminuyendo la variación hasta llegar a la situación extrema de una recta horizontal, que mantiene el mismo contenido de agua a lo largo de todo el año.

Se resume que el cerramiento con mayor espesor de poliuretano posee mayor contenido de agua. En particular, el poliuretano con mayor espesor tiene un mayor contenido de agua.

La influencia del espesor del aislamiento en la transmitancia térmica

Es de relevancia recordar que cuando se hablaba de los materiales y su comportamiento hídrico se observaba que variaba la conductividad térmica. En el caso de la conductividad térmica del aislamiento de la espuma de poliuretano varía según el contenido de humedad de una forma significativa, tal y como se indicaba en el capítulo II

Tras las simulaciones con los diferentes espesores y recordar la importancia de la humedad en el aislamiento, a continuación se extraen los resultados obtenidos de transmitancia térmica de los distintos cerramientos.

Inicialmente se han extraído los resultados según cada tipo de simulación analizada donde se indican los valores de transmitancia térmica U en estado seco de los materiales y al 80% de humedad relativa de los mismos.

Simulaciones Fachada Ventilada de Granito	Código	U W/ m ² K Estado seco materiales	U W/ m ² K 80%Humedad relativa materiales	Diferencia U _{seco} /U ₈₀ %
Sin aislamiento	FVG0S	1,696	1,814	106,96%
3 cm de poliuretano	FVG0C3	0,629	0,65	103,34%
5 cm de poliuretano	FVG0C5	0,443	0,455	102,61%
9 cm de poliuretano	FVG0C9	0,279	0,284	101,79%
11 cm de poliuretano	FVG0C11	0,235	0,24	102,13%
15 cm de poliuretano	FVG0C15	0,179	0,182	101,68%
30 cm de poliuretano	FVG0C30	0,094	0,096	102,13%

Tabla V.19: Valores de U transmitancia térmica (W/m²K) en estado seco y al 80% de Humedad relativa obtenidos por el programa Wufi Pro 5.3

De la tabla V.19 se evidencia que la U de cálculo da mayores valores cuando se tiene en consideración la humedad relativa en los materiales. Si el cerramiento tiene aislamiento térmico, el incremento del valor U debido a la humedad de los materiales difiere entre un 1,5 y un 3,4%. En el cerramiento sin aislamiento es el que más difiere y lo hace en un 7%.

Si se analizan los datos de la última columna de la tabla anterior gráficamente, se obtiene la figura que se representa a continuación. En ella se puede observar cual es el incremento de transmitancia térmica del valor U en seco con respecto al valor U al 80% en tanto porcentual. Es, como se ha advertido anteriormente, la solución constructiva sin aislamiento, la que proporciona mayor incremento, de un 6,96%. En contraposición, la solución de 9cm y 15cm con valores respectivos de incremento de 1,79% y 1,68% son las que menor incremento tienen.

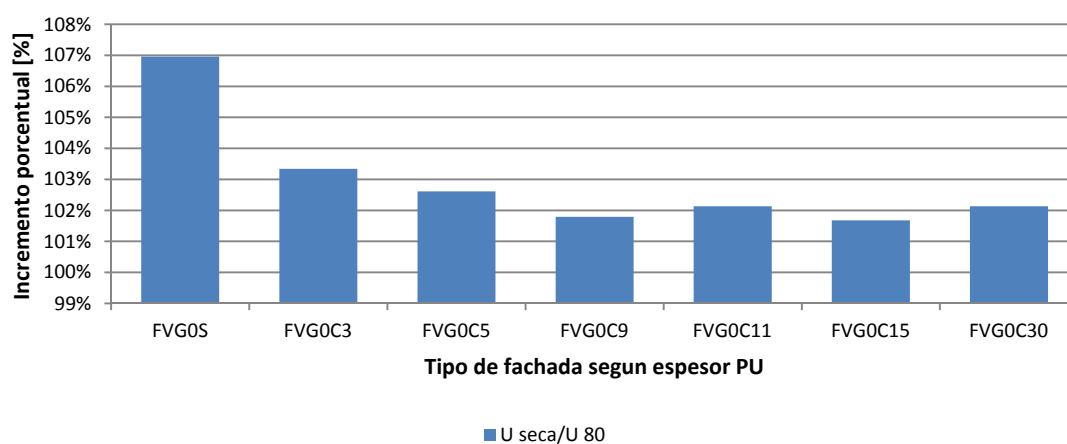


Figura V.57: Diagrama de barras del incremento porcentual del valor U (W/m²K) entre la U en seco y la U con contenido del 80% de humedad relativa según espesores de aislamiento. Resultados Wufi Pro 5.3

Como resultados, además de los valores estáticos de transmitancia térmica de los cerramientos valor-U en seco y al 80% de humedad relativa, también se han obtenido valores mensuales de transmitancia térmica en los diferentes meses del año exceptuando agosto.

En la figura V.58 sólo se representan los valores de las diferentes simulaciones.

En una primera aproximación se puede extraer que el aislamiento es determinante en la mejora del valor U, tal y como se reflejó en los resultados de transmitancia térmica U seco y U 80%.

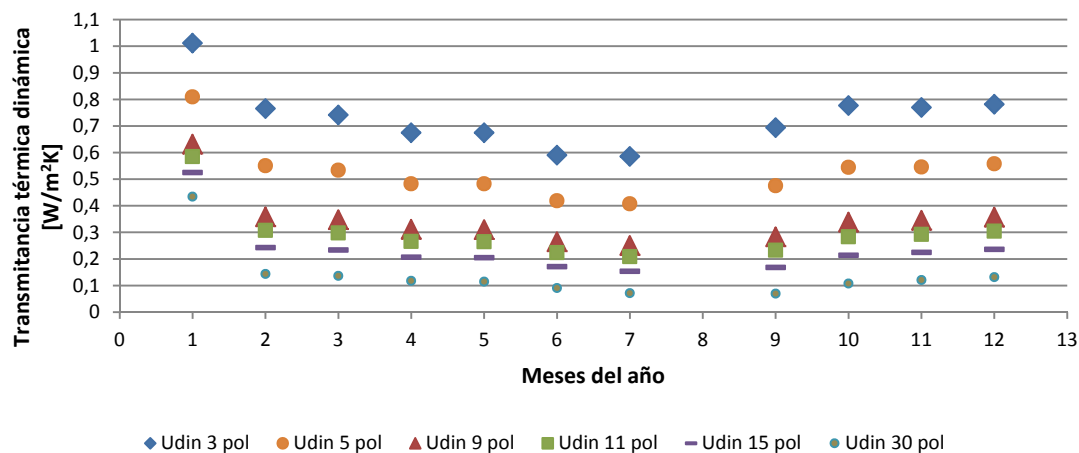


Figura V.58: Valores de U ($\text{W/m}^2\text{K}$) transmitancia térmica mensual (excepto agosto) durante el primer año de los distintos espesores de aislamiento analizados. Resultados Wufi Pro 5.3

Si se compara el valor medio mensual de transmitancia térmica con la transmitancia térmica seca y al 80% de HR, se observa que las diferencias entre las transmitancias térmicas dinámicas y las estacionarias van creciendo a medida que aumenta el espesor del aislamiento con valores de incremento con respecto a la U seca del 11,86% al 17,87% y entre 3,96% y 15,42% con respecto a la U 80% de HR.

En el caso particular de la simulación del aislamiento de 3cm de poliuretano (enmarcada), las diferencias de incremento de la U son del 11,86% con respecto a la U seca y del 3,96% a la U 80% de HR.

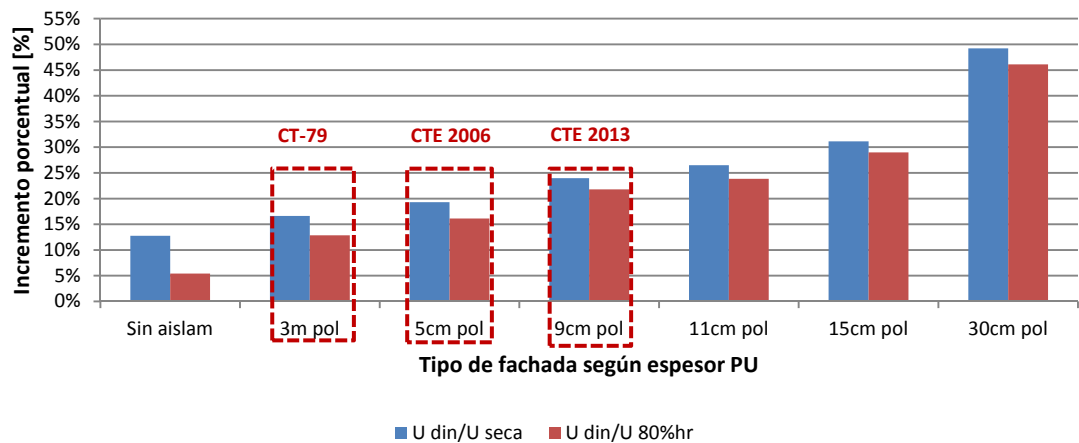


Figura V.59: Incremento porcentual del valor U ($\text{W/m}^2\text{K}$) entre la media de la U con respecto a la U en seco y entre la media de la U mensual con respecto a la U al 80% de HR, según los distintos espesores de aislamiento analizados en la localización C1 A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

A continuación se muestra unas figuras elaboradas para la situación del cerramiento sin aislamiento, con aislamiento de 3cm, 5cm y 9cm, con los valores estáticos representados en

líneas rectas y los valores mensuales durante un año. Espesores que son resultado de las diferentes normativas a lo largo de los 20 años.

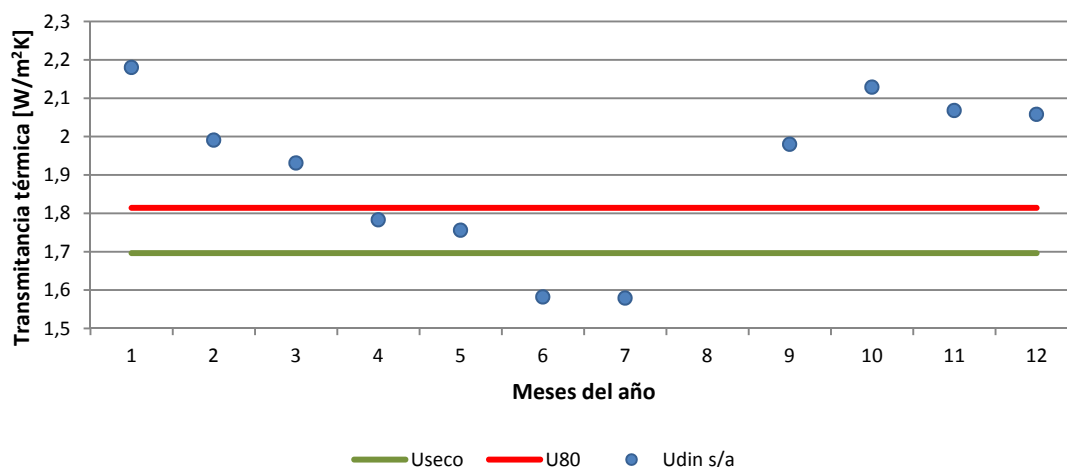


Figura V.60: Valores de transmitancia térmica U seco, U 80 y transmitancia térmica U mensual para la simulación sin aislamiento térmico. Resultados Wufi Pro 5.3

En el caso del cerramiento sin aislamiento, se observa que la transmitancia térmica mensual oscila con valores mayores que las transmitancias térmicas estáticas en los meses de enero, febrero y marzo, así como septiembre, octubre, noviembre y diciembre. Es en los meses de junio y julio que la transmitancia térmica mensual es mejor que los valores estáticos.

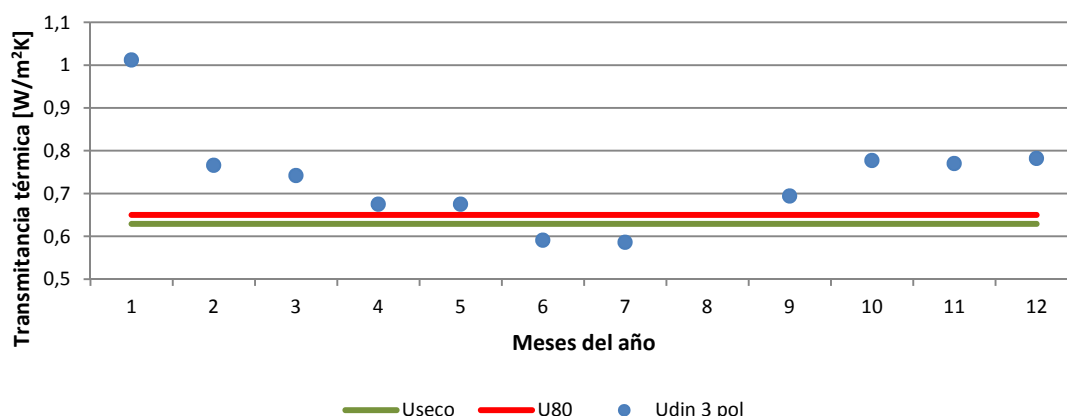


Figura V.61: Valores de transmitancia térmica U seco, U 80 y transmitancia térmica U mensual para la simulación con aislamiento térmico de 3cm de poliuretano, caso cumplimiento CT-79 en localización A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Si se analiza la figura anterior, existe la misma tendencia con el cerramiento de 3cm. Sin embargo, ya sólo son dos valores en el mes de junio y julio los inferiores a los valores en estado seco y con humedad relativa al 80%. Si se incrementa el espesor del aislamiento se ve que siguen siendo estos dos meses de junio y julio inferiores a esos valores estáticos. También a medida que va creciendo el espesor, las transmitancias térmicas poseen menos diferencia, ya que la amplitud se va reduciendo.

De estas figuras se ve claramente el comportamiento sinusoidal de la transmitancia térmica mensual U. Se observa que para la localización de A Coruña C1, el valor de la transmitancia térmica en los meses de verano tiene valores más bajos que los recogidos en las U estáticas y en época de invierno los valores se reflejan más altos. Esto se advierte de gran importancia, ya que son los meses de más frío, lluvia y viento los que necesita el edificio acondicionar y no los meses de verano. Además el parámetro de la U en cerramientos es determinante para el futuro gasto energético que pudiese tener un edificio.

A la pregunta final sobre si el incremento de pérdida de calor debido a la utilización de aislamientos y/o materiales húmedos exceden de los requerimientos de conservación de la energía, se puede decir que en el caso de 9cm de poliuretano el valor de U estático al 80% de humedad relativa es inferior al indicado por el actual C.T.E. DB-HE-1 2013. Sin embargo, existen valores mensuales durante los 6 meses de otoño e invierno superiores al indicado por la norma.

Es curioso indicar que según los resultados de la simulación obtenidos, para garantizar que todo el año pudiese tener el valor U por debajo de $0,29 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, deberíamos irnos a un espesor de aislamiento de 15cm, 6 cm más de lo que marcan los cálculos estáticos, es decir, un 66% de incremento en el espesor de poliuretano.

V.3.2 INFLUENCIA DEL ESPESOR Y GRADO DE VENTILACIÓN DE LA CÁMARA DE AIRE

En este apartado se trata de analizar si el espesor es determinante para el mejor comportamiento higrotérmico, en este sentido se quiere decir, que el cerramiento tenga la capacidad de secarse y que como consecuencia almacene poca cantidad de agua para que la influencia de la humedad sobre el comportamiento térmico sea baja.

Para ello se suponen tres cerramientos con diferentes espesores en la cámara ventilada, $e=2\text{cm}$, $e=5\text{cm}$, $e=9\text{cm}$ y 15cm . Ver tabla V.17. El primero con muy poco espesor, más parecido a los sistemas de cerramientos de madera tipo “*rainscreen*”, el espesor de 5cm, muy común en las soluciones de fachada ventilada en estas localizaciones y finalmente los espesores superiores $e=9\text{cm}$ y $e=15\text{cm}$. El resto de los parámetros incorporados en el cálculo se ha elegido adecuándose a la situación de la fachada real ejecutada.

El contenido total de agua en los cerramientos simulados

Los datos de contenido total de agua en Kg/m^2 extraídos del programa indican que en un inicio se partía de aproximadamente el mismo contenido de agua en los tres supuestos espesores. Sin embargo, al cabo de los cinco años de simulación, los datos han mostrado que la reducción del contenido de agua en el cerramiento es mayor en la solución constructiva con mayor espesor de la cámara de aire. Todos estos cerramientos tienen la capacidad de secado.

Parámetros de espesor de cámara de aire	Parámetros fijos 0-10-C3-F4	Inicio	Fin	Diferencia
	2cm	21,8	19,4	-11,00%
	5cm	21,9	19,4	-11,42%
	9cm	22,0	19,3	-12,29%
	15cm	22,1	19,1	-13,63%

Tabla V.20: Valores iniciales y finales del contenido total de agua Kg/m^2 obtenidos en la simulación. Resultados Wufi Pro 5.3

De los valores indicados en la tabla V.17, Todas las soluciones del cerramiento facilitan el secado del mismo, siendo la solución del espesor de 15cm, la que más ha reducido el contenido total de agua.

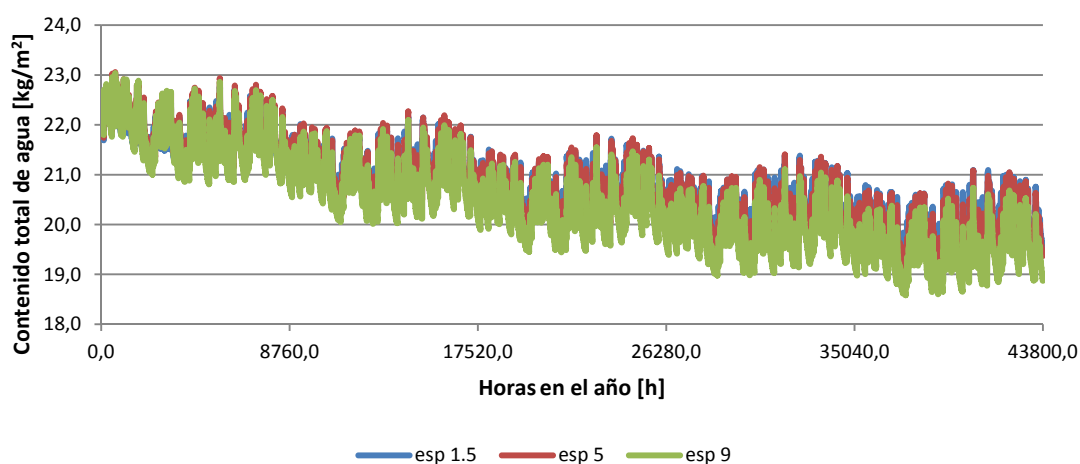


Figura V.62: Contenido total de agua en Kg/m^2 según espesores de la cámara de aire en cm durante los cinco años de simulación. Resultados Wufi Pro 5.3

Representando los contenidos totales de humedad horarios del cerramiento durante cinco años con las cuatro opciones de espesores de la cámara, se observa la tendencia es de reducción y la gráfica levemente oscilatoria, dependiendo de la situación climática estacional, aunque si bien, el primer año es el más dispar.

Se resume que la fachada ventilada analizada va reduciendo el contenido total de agua en todos los casos. Sin embargo, es mayor la reducción en el caso del espesor de cámara mayor.

El contenido de agua en la cámara de aire

Pero, ¿qué está pasando en la cámara de aire del cerramiento? El gráfico que a continuación se presenta, indica el comportamiento del contenido de agua en Kg/m^3 en la cámara de aire en el último año de simulación de los cinco años simulados. Se observa que es un comportamiento oscilatorio anual pero más acentuado (con mayor amplitud) en el espesor de la cámara de 2cm.

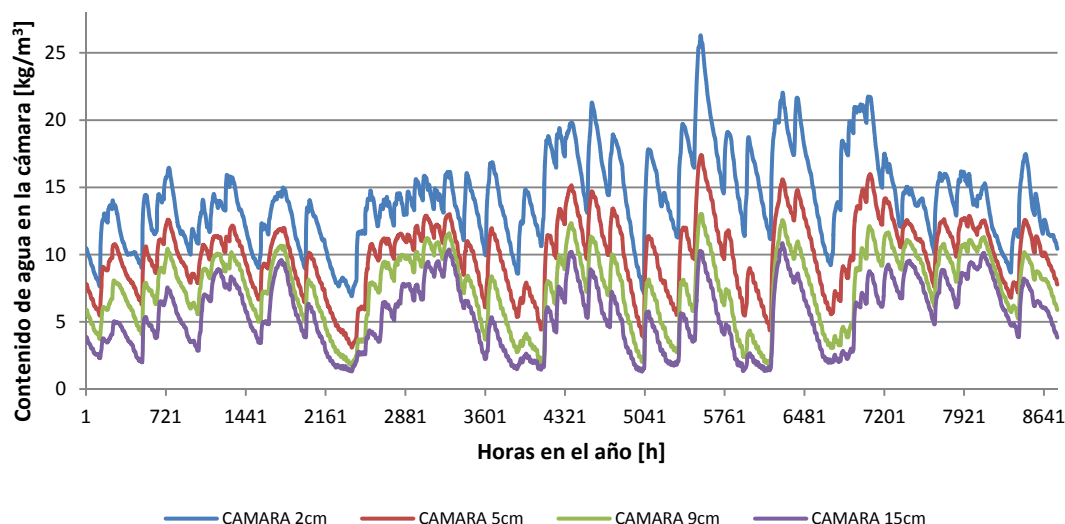


Figura V.63: Contenido total de agua en el cerramiento durante el último año suponiendo diferentes espesores de la cámara. Resultados de simulación Wufi Pro 5.3

espesor	2cm	5cm	9cm	15cm
Inicio simulación	1,88 Kg/m ³	1,88 Kg/m ³	1,88 Kg/m ³	1,88 Kg/m ³
Fin simulación	10,43 Kg/m ³	7,77 Kg/m ³	3,95 Kg/m ³	3,95 Kg/m ³
Diferencia [%]	+554,79	+413,30	+210,11	+203,72

Tabla V.21: Valores de contenido de agua en Kg/m³ en la cámara de aire de la fachada ventilada según diferentes espesores de la cámara al principio y al final de la simulación. Resultados Wufi Pro 5.3

Los datos extraídos y dispuestos en la tabla V.21 indican numéricamente el aumento del contenido de agua, que en este caso es mayor cuanto menor sea el espesor de la cámara de aire. En el caso más desfavorable, con un espesor de 2cm el aumento de contenido de agua se incrementa en un 554,8%. El caso con menor incremento se refiere al espesor analizado de 15cm con un incremento de contenido de agua de un 203,7% sobre el valor inicial.

Finalmente se puede afirmar que la fachada ventilada con 2 cm de espesor es la que mantiene un mayor grado de humedad al final de la simulación

La influencia en la transmitancia térmica

Se confirma en este caso la suposición inicial de la dependencia del valor de la transmitancia en relación al contenido de humedad de la cámara. En la gráfica inferior se puede observar los valores de transmitancia térmica en W/m²K en cuatro colores diferentes. El color azul claro corresponde al espesor de la cámara de 2cm. El color azul oscuro, el espesor de 5cm. El color verde corresponde con el espesor de la cámara de 9cm. Finalmente el rojo al espesor de 15cm.

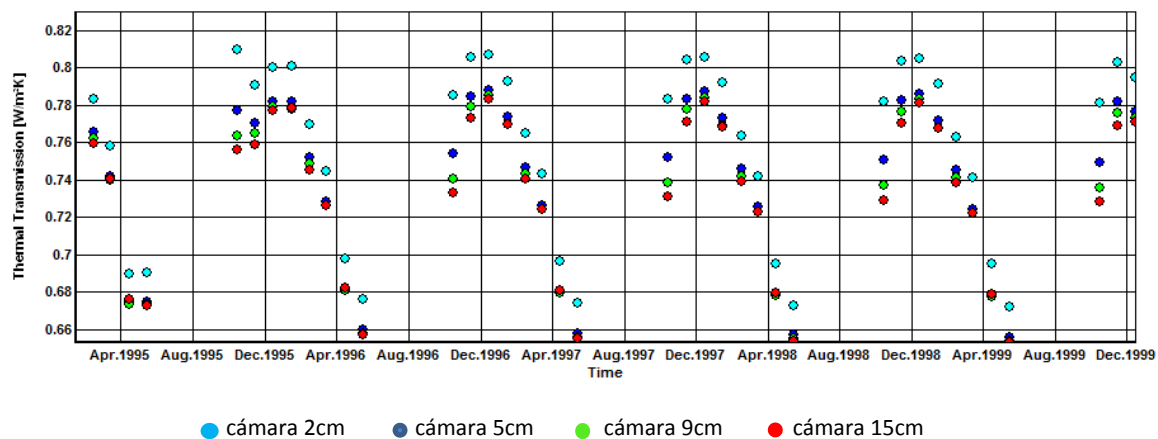


Figura V.64: Valores de transmitancia térmica mensuales durante los cinco años simulados. Resultados Wufi Pro 5.3

Se ve que las oscilaciones con valores mayores se corresponden con espesores de cámara menores y donde más contenido de agua hay en la cámara.

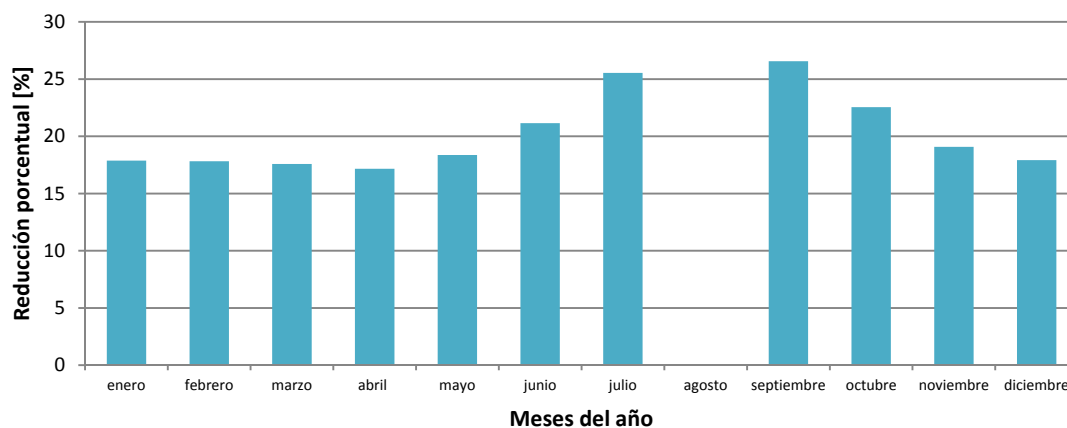


Figura V.65: Reducción mensual en porcentaje en el último año de simulación entre el valor de transmitancia térmica del espesor de la cámara 2cm con respecto al espesor de la cámara de 9cm. Resultados Wufi Pro 5.3

En concreto, y si se analiza la diferencia de la transmitancia térmica, se observa que varía entre 17,16 y 26,56%, considerando los espesores de 1,5cm como el más desfavorable (valores mayores de transmitancia térmica) y el espesor de 9cm (valores menores de transmitancia térmica).

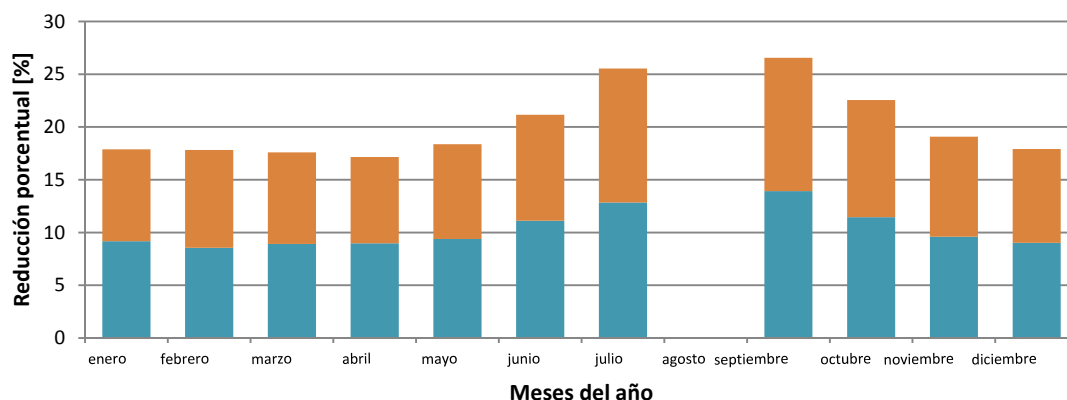


Figura V.66: Reducción mensual en porcentaje en el último año de simulación entre el valor de transmitancia térmica del espesor de la cámara de 5cm y 9cm con respecto al espesor de la cámara de 2cm. Resultados Wufi Pro 5.3

En esta gráfica se puede visualizar el incremento proporcional del valor de la transmitancia térmica según los diferentes espesores de 2cm a 5cm y de 5cm a 9cm y que es prácticamente la mitad.

Para rematar, indicar que la transmitancia térmica aumenta siempre en valor positivo en proporción a la reducción del espesor de la cámara ventilada.

La velocidad de aire en la cámara

Se ha considerado relevante también hacer simulaciones variando la velocidad del aire dentro de la cámara, puesto que es un parámetro que contribuye al secado del cerramiento.

El ratio de intercambio de aire en la cámara es dependiente de la construcción, superficie, color y aberturas de ventilación.

Los ratios de intercambio de aire normalmente no son conocidos, puede ser útil variar el ratio de intercambio de aire para ver la influencia en el comportamiento higrotérmico de la construcción. Los ratios de intercambio de aire normalmente están entre 10 y 200 (ren/h)

Ratio de intercambio de aire [ren/h]	10	20	50	100	200	857
--------------------------------------	----	----	----	-----	-----	-----

Tabla V.22: Parámetros elegidos para la variación de intercambio de aire y su incorporación en el estudio de sensibilidad

Los supuestos considerados en la simulación pueden verse en las tablas V.22 y V.23. Se analizan seis tipos diferentes ratios de intercambio de aire en la cámara, siendo el ratio de 10, el que menos intercambia aire y 857, el mayor ratio de intercambio de aire.

Parámetros de lluvia incidente	Ratio de intercambio de aire en la cámara 1/h	Codificación
ASHRAE $F_E = 1,4$; $F_D = 2,0$	10	FVG. 11
	20	FVG. 12
	50	FVG. 13

	100	FVG. 14
	200	FVG. 15
	857	FVG. 16

Tabla V.23: Simulaciones efectuadas en el programa WUFI Pro 5.3 variando parámetros de intercambio de aire en la cámara

Contenido total de agua en los cerramientos simulados

Los datos recogidos de contenido total de agua en Kg/m^2 al final de los cinco años de simulación y en todos los supuestos, se reflejan en la tabla V.24:

Parámetros de ratio de intercambio de aire 1/h	Parámetros fijos 0-F4	Inicio	Fin	Diferencia
	s/v	21,9	19,8	-9,41%
	10	21,9	19,4	-11,42%
	20	21,9	18,7	-14,61%
	50	21,9	18,0	-17,81%
	100	21,9	17,7	-19,18%
	200	21,9	17,6	-19,63%
	857	21,9	17,5	-19,92%

Tabla V.24: Contenido total de agua al principio y al final de los cinco años de las simulaciones efectuadas.
Resultados Wufi Pro 5.3

Todos los supuestos tienen un contenido total de agua final menor que al principio, es decir, unos kilos de agua por metro cuadrado de cerramiento. Se observa claramente que la reducción mayor del contenido total de agua es hecha por el cerramiento con el mayor ratio de intercambio de aire en la cámara. La diferencia analizada entre la fachada con el menor intercambio de aire y la que más es de una diferencia de reducción de un 8,21%

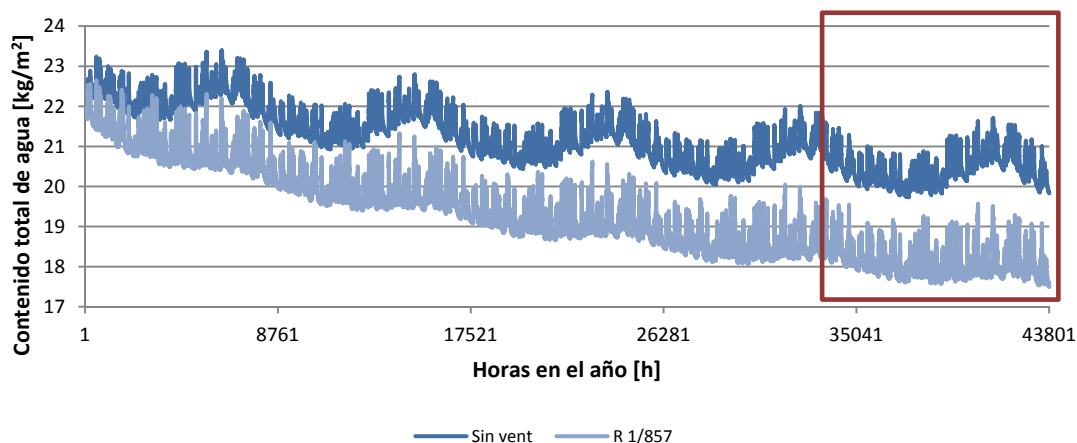


Figura V.67: Contenido total de agua en Kg/m^2 a lo largo de los cinco años de simulación del mayor intercambio de aire en relación a la cámara sin ventilar. Resultados Wufi Pro 5.3

La figura V.67 representa durante los cinco años la tendencia del contenido total de agua con los ratios más extremos de ventilación. Se observa una tendencia oscilatoria de reducción del contenido total de agua en el cerramiento, siendo más pronunciada, como anteriormente se ha indicado en el caso del ratio de intercambio de aire de 857.

En definitiva, la simulación corrobora lo esperado, que todos los ratios de intercambio de aire reducen el contenido total de agua del cerramiento, siendo mayor en el caso de del mayor ratio de intercambio, $h=857$.

Si se detalla el contenido total de agua en el último año de simulación, y se disponen varias tasas de renovación de aire, puede observarse que, con diferencia es el cerramiento sin ventilación el que más contenido de agua posee. Para las tasas de renovación más bajas, un ligero incremento en la renovación de aire, produce una rebaja significativa de contenido de agua. Esto sucede hasta tasas de renovación de aire $R=1/50$. A partir de esta tasa la rebaja del contenido de agua no se detecta ser tan importante.

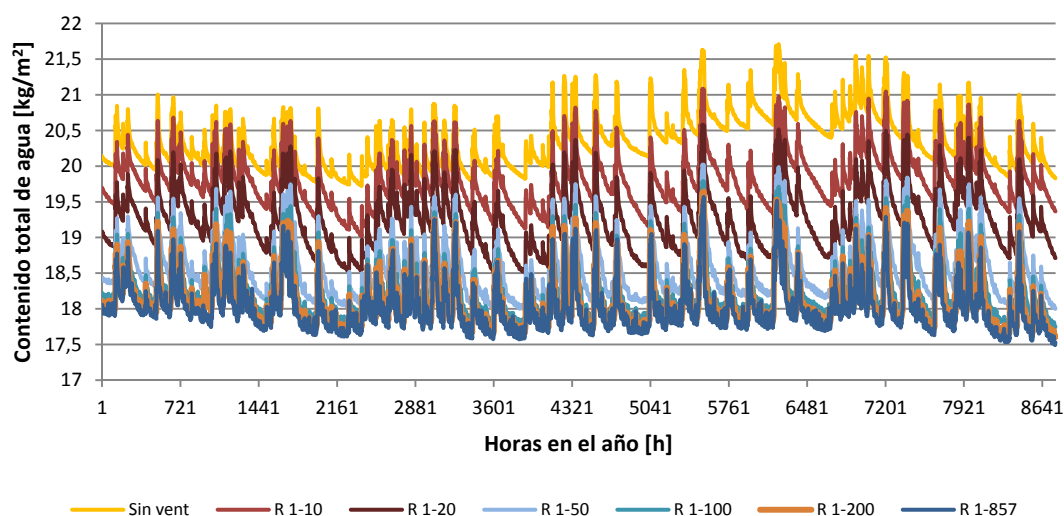


Figura V.68: Contenido total de agua en el cerramiento en un año variando las tasas de renovación de aire. Resultados Wufi Pro 5.3.

El contenido de agua en la cámara de aire

Si se analizan los datos que se han extraído del programa, se deduce que el contenido de agua en la cámara de aire se va reduciendo a medida que aumenta el ratio de intercambio de aire en la cámara. Si bien esta tendencia vuelve a elevarse ya que el valor mínimo de contenido de agua se alcanza con el ratio de intercambio de 100, aumentando levemente en el ratio de 200 y con 857. En la tabla V.25 se indican los valores obtenidos en las simulaciones. Se han tenido dificultades en realizar las simulaciones, sobre todo de los valores más altos, ya que han dado más problemas.

	s/v	V10	V20	V50	V100	V200	V857
Inicio simulación	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88
Fin simulación	11,75	7,77	3,49	1,12	1,05	1,11	1,39
Diferencia [%]	+625	+413,30	+185,64	-40,43	-44,15	-40,96	-26,06

Tabla V.25: Contenido de agua en la cámara de aire en Kg/m^3 según ratios de intercambio de aire al inicio y al final de la simulación. Resultados Wufi Pro 5.3

En la figura V.69 que muestra el contenido de agua en la cámara en relación a los diferentes ratios de ventilación, se observa un comportamiento oscilatorio y repetitivo anual. Los valores

son superiores, a lo largo de los cinco años, cuanto menor sea el valor del ratio de intercambio de aire.

Se representan también los resultados del contenido de agua en la cámara de aire durante el quinto año de simulación. Se observa claramente la diferencia entre renovar el aire de la cámara a no hacerlo. Sin embargo, a partir de ratios de renovación de aire $R=1/50$, no está tan claro la rebaja del contenido de agua en la cámara.

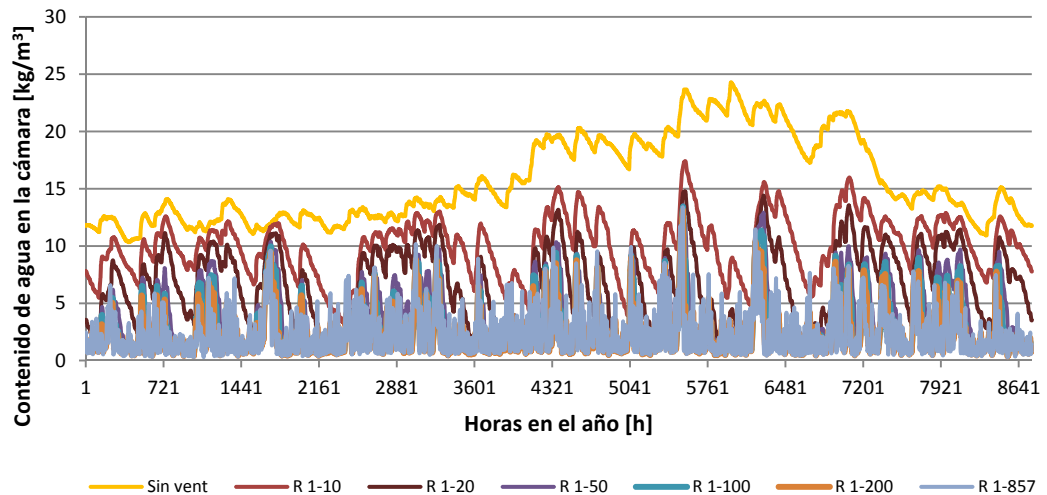


Figura V.69: Contenido de agua en la cámara durante un año suponiendo renovaciones de aire. Resultados de simulación Wufi Pro 5.3

Resumiendo, con los ratios de intercambio de aire de 10 y 20, al final de la simulación el contenido de agua de la cámara en Kg/m^3 es superior al del inicio. Sin embargo, en los ratios 50, 100, 200 y 857 el contenido de agua al final de la simulación es menor.

El valor de la transmitancia térmica

Se analiza entonces, cómo se produce la variación de transmitancia térmica considerando los supuestos de ratios diferentes. La siguiente figura muestra esa variación.

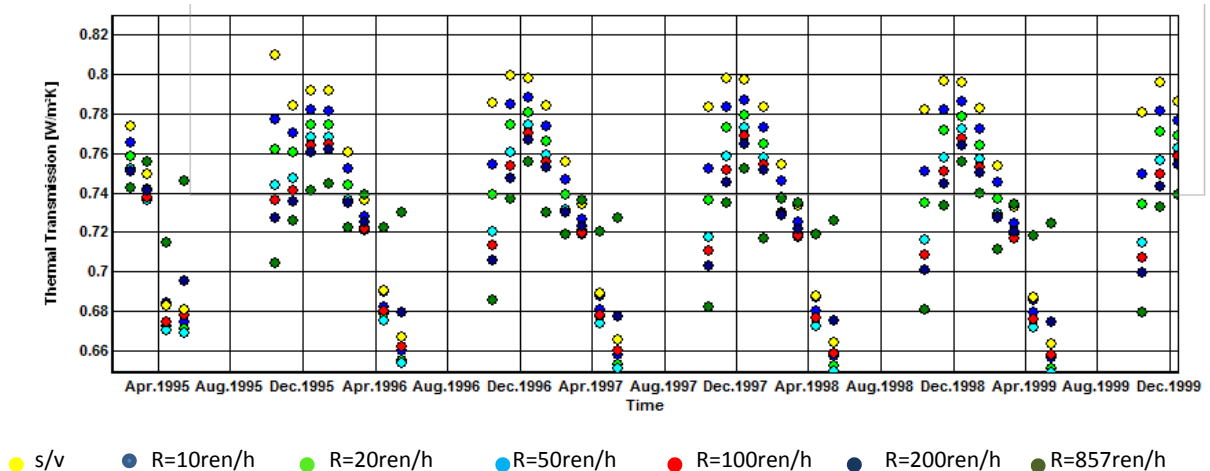


Figura V.70: Valores de transmitancia térmica de los diferentes ratios de velocidad de aire. Resultados Wufi Pro 5.3

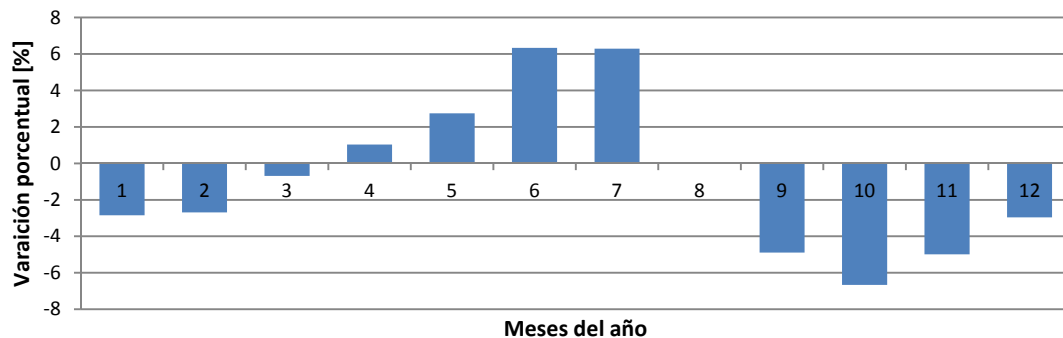


Figura V.71: Variación en porcentaje % de la transmitancia térmica $U \text{ W/m}^2\text{K}$ entre el supuesto de ratio de intercambio de aire más bajo 10 con respecto al más alto 200 en el último año de simulación. Resultados Wufi Pro 5.3

La variación obtenida en valor absoluto, oscila entre 0,64% y 6,67% del valor de la transmitancia térmica mensual en el último año de simulación. Estos valores fueron obtenidos comparando el ratio 10 de intercambio de aire en la cámara con respecto al ratio 200. En la gráfica se expresa que los meses de abril, mayo, junio y julio son meses en los que se incrementan el valor de U cuando aumentamos el ratio de intercambio de aire. Sin embargo, los meses de enero, febrero, marzo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre son meses más fríos y cuando la velocidad de aire aumenta, se produce una reducción del valor de transmitancia térmica.

Se puede concluir que, en los meses más fríos del año, el aumento de la ratio de intercambio de aire en la cámara conlleva una reducción de la transmitancia térmica. Por el contrario, en los meses de abril, mayo, junio y julio cuando se aumenta el ratio de intercambio de aire, se aumentan los valores de transmitancia térmica. Estos resultados sugieren un comportamiento estacional.

El aumento del ratio de intercambio de aire supone un auxilio para la cámara y el secado de la misma, aunque no consigue de forma completa reducir el valor de la transmitancia térmica en todos los meses.

V.3.3 INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL APLACADO EXTERIOR DE GRANITO

Si bien el espesor de granito del aplacado externo no afecta al valor de la transmitancia térmica en sí mismo, sin embargo, se ha considerado que a mayor espesor, puede que haya mayor humedad en la cámara de aire y que ésta situación pueda interferir en el resto.

Para ver cuánto incide el espesor del aplacado de granito sobre su comportamiento higrotérmico, se realizaron tres simulaciones suponiendo tres espesores diferentes: 1,5cm, 3cm y 6cm. Puede verse en la tabla V.23 las simulaciones efectuadas. Los datos incorporados a la simulación, supusieron asimilar la condiciones climáticas de A Coruña C1, orientación norte, suponiendo la opción más desfavorable de lluvia incidente y el ratio de intercambio de aire menor, situación real.

Contenido total de agua en los cerramientos simulados

Parámetros de espesor de granito	Parámetros fijos 0-10-C3-F4	Inicio	Fin	Diferencia
	1,5cm	21,8	18,9	-13,30%
	3cm	21,9	19,4	-11,42%
	6cm	22,1	20,1	-9,05%

Tabla V.26: Resultados del contenido total de agua en Kg/m² al inicio y al final de las simulaciones realizadas.

Resultados Wufi Pro 5.3

Con respecto al contenido total de agua en el cerramiento, la tabla V.26 muestra el valor en Kg/m² del contenido total de agua inicial y tras cinco años de simulación en el cerramiento. Los valores extraídos del programa parecen indicar que al aumentar el espesor del aplacado, se obtienen diferencias de valores menores, eso significa que el contenido total de agua se ve reducido de forma menor cuando el espesor del granito es grande.

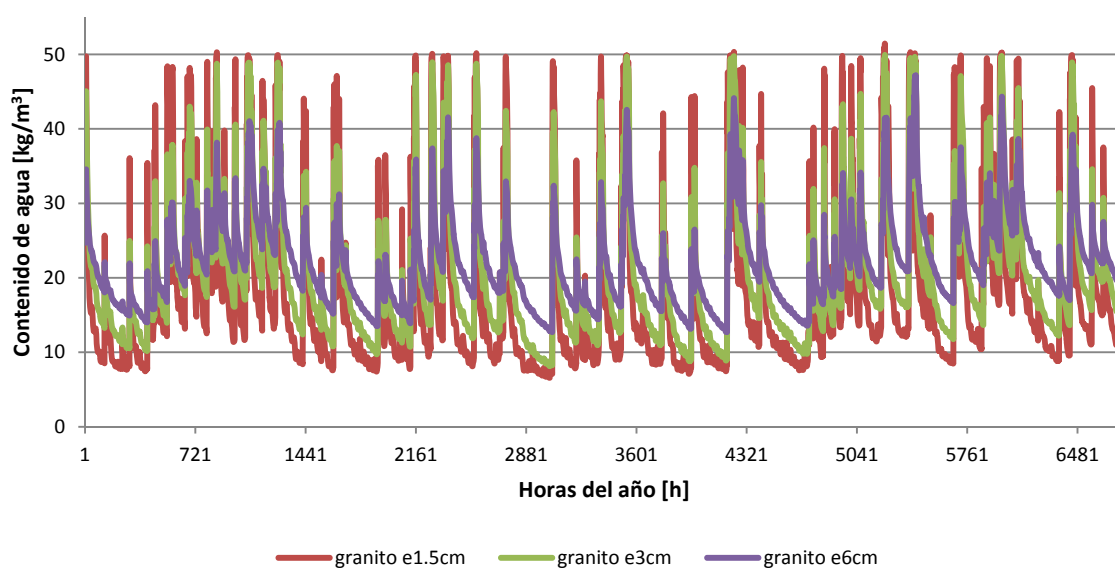


Figura V.72: Contenido de agua en Kg/m³ en el granito durante el último año de simulación según espesores diferentes de aplacados. Resultados Wufi Pro 5.3

Si analizamos el contenido de agua en el granito y se representa el último año de simulación del contenido de agua en el aplacado de granito, se extrae que el aplacado con más espesor e=6cm tiene en los valores mínimos de contenido de agua el mayor valor (véase el color violeta). Sin embargo, para los valores más altos de contenido de humedad es el cerramiento con el espesor menor, color rojo. Asimismo la amplitud mayor de valores de contenido de agua se muestra en el espesor de granito menor. Por el contrario, el espesor de granito mayor tiene la amplitud (diferencia entre valores mínimos y máximos) menor. Esto quiere decir que el granito con menor espesor es en el que entra más contenido de agua y a su vez seca más que el resto de los espesores de granito.

Se puede concluir que espesores pequeños de aplacados en fachadas ventiladas analizadas consiguen una reducción mayor del contenido total de agua que espesores mayores a pesar de tener menos amplitud de valores.

La transmitancia térmica según los diferentes espesores de aplacado de granito

Se planteó la pregunta si el espesor del aplacado de granito contribuía a la variación de la transmitancia térmica del cerramiento. Para ello se hicieron diferentes simulaciones de espesores variables del aplacado.

En la figura V.73 se observa el comportamiento mensual dependiendo del espesor del aplacado de granito. Parece que los meses más fríos del año, enero, febrero y diciembre son los que el aplacado de granito de 6cm obtiene mejores valores de transmitancia térmica, es decir, valores más bajos. Sin embargo y en contraposición, en el mes de junio y julio, es el cerramiento de menor espesor $e=1.5\text{cm}$, el que obtiene valores más bajos de transmitancia térmica.

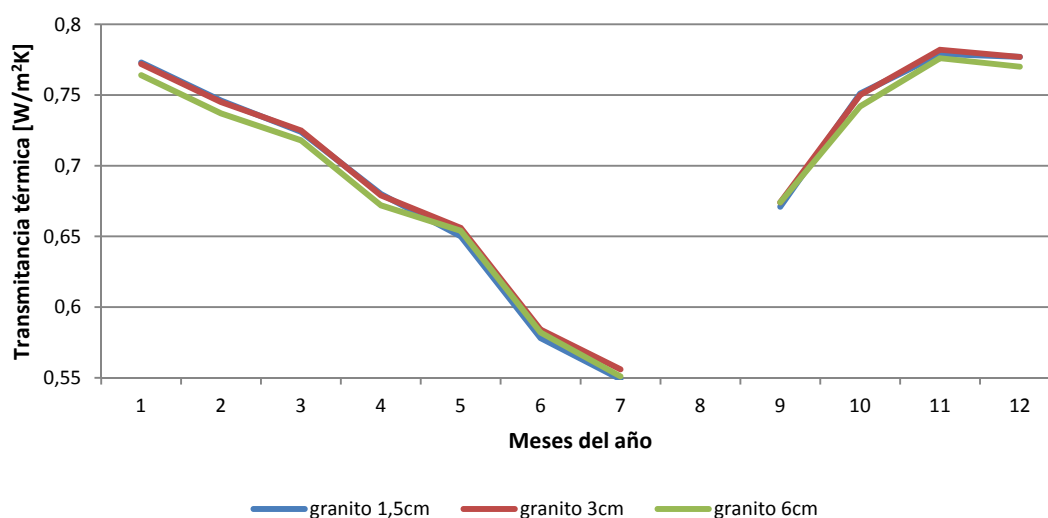


Figura V.73: Valores de transmitancia térmica mensual en $\text{W/m}^2\text{K}$ de la fachada ventilada del último año de simulación según diferentes espesores de aplacado. Resultados Wufi Pro 5.3

En conclusión, parece que la tendencia al aumento de espesor en estos rangos de 1.5cm a 6cm, mejora levemente el comportamiento en la transmitancia térmica en los meses fríos. A su vez, este aplacado con más espesor es el que posee más baja amplitud en la oscilación, es decir, el rango de variación del contenido de agua es el menor. En cuanto al comportamiento total de agua en el cerramiento, el aplacado con 6cm de espesor, se observa que la reducción del contenido de agua, es la mínima.

V.3.4 INFLUENCIA EN LA COMPOSICIÓN DE LOS MATERIALES DE CERRAMIENTO Y SU HUMEDAD RELATIVA INICIAL COMPORTAMIENTO TÉRMICO

Se ha querido conocer también el comportamiento de otros sistemas constructivos, en particular, de la fachada tradicional de granito en Galicia mediante la modelización de la sillería-mampostería de granito tradicional realizada para incorporarla a la simulación: espesor de granito: 20cm, espesor del mortero de cemento-cal: 4cm, espesor de granito: 20cm, mortero de cemento-cal: 1cm y revoque de yeso: 1cm

Esta solución constructiva ha sido simulada durante 30 años para observar cual es el comportamiento higrotérmico y si en definitiva difiere mucho del sistema de fachada ventilada de granito analizada.

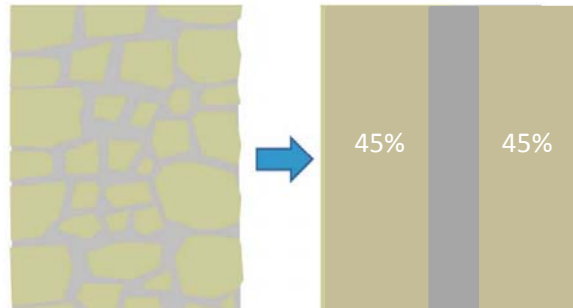


Figura V.74: Forma de modelado de la mampostería de granito para la introducción en la simulación de Wufi Pro 5.3
Espesor total: 46 cm

Contenido total de agua en el cerramiento

Realizada la simulación de los 30 años y obtenida la gráfica del contenido total de agua en el cerramiento se observa que la curva se vuelve con tendencia a la horizontalidad hasta pasados cuatro años aproximadamente, si bien, se producen las oscilaciones anuales correspondientes al clima al que está expuesto.

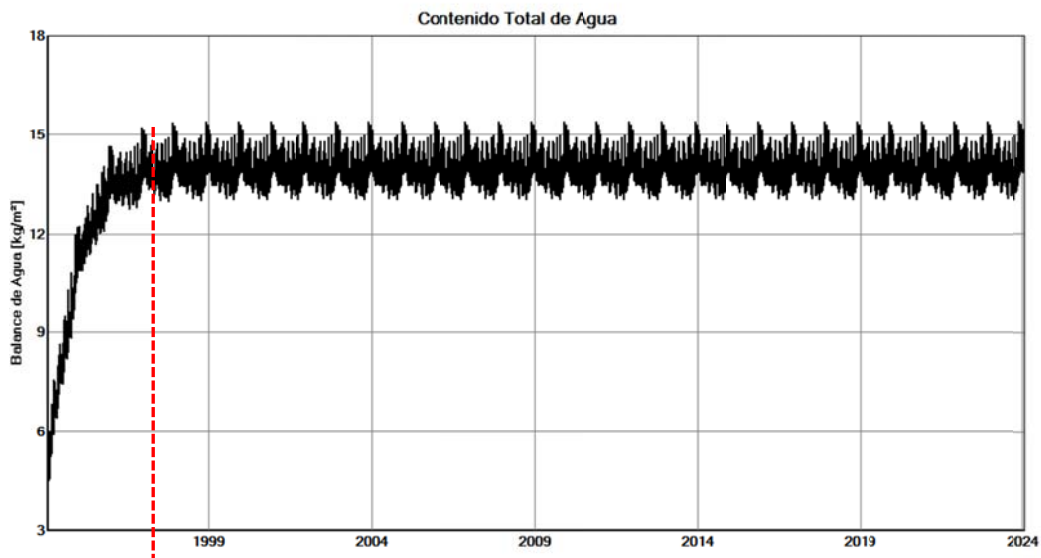


Figura V.75: Contenido total de agua del cerramiento tradicional en Galicia Kg/m^2 (mampostería-sillería de granito) durante 30 años. Resultados obtenidos Wufi Pro 5.3

Se observa la asíntota horizontal de equilibrio de secado a partir de aproximadamente el cuarto año en este sistema tradicional de granito.

Si en vez de disponer un cerramiento simple de granito **se dispusiese sólo de un muro de hormigón armado**, ¿Qué sucedería con el contenido total de agua?

A continuación se extrae la figura V.76 del contenido total de agua que se obtendría con un muro de hormigón. Es de observar que en el hormigón, a partir de los 2,5 años, la asíntota de la curva se vuelve horizontal.

Se observa la asíntota horizontal de equilibrio de secado a partir de aproximadamente veinticinco años en el sistema de fachada ventilada de granito.

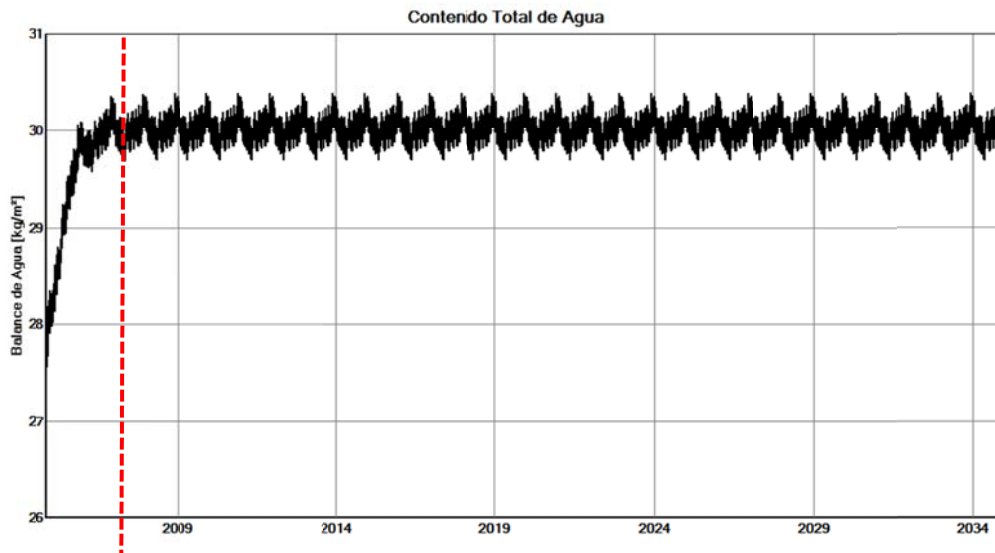


Figura V.76: Contenido total de agua de un muro de hormigón de 24cm durante 30 años. Resultados obtenidos Wufi Pro 5.3

Contenido de agua por capas: El caso del muro soporte de hormigón

A continuación se representan los valores del contenido de agua del componente hormigón en el sistema de fachada ventilada puede analizarse en el siguiente gráfico extraído del programa:

En la figura V.77 se aprecia que el soporte de hormigón alcanza su humedad de equilibrio después de 20 años (desde 2004 hasta 2024) en un contenido de 85 kg/m³.

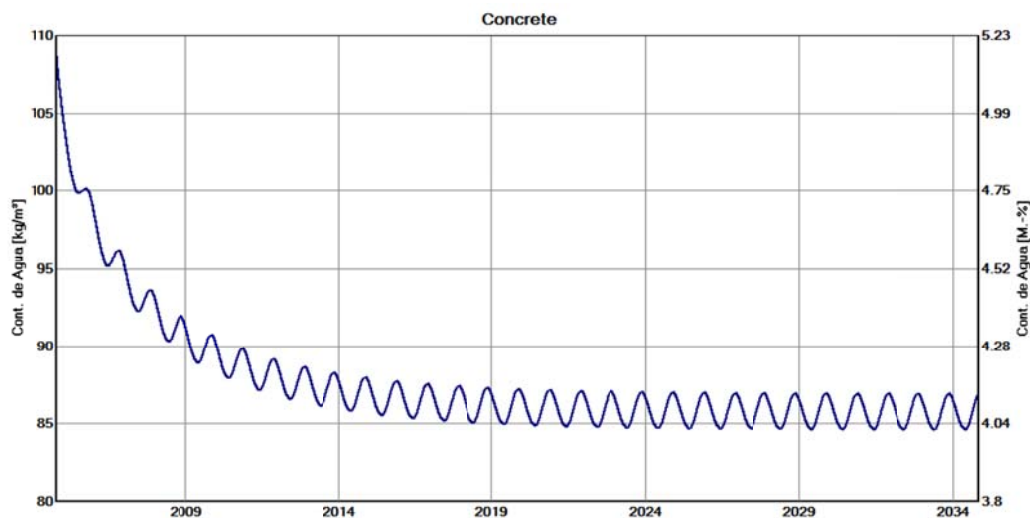


Figura V.77: Contenido de agua en Kg/m³ en la capa soporte de hormigón de la fachada ventilada de 3cm de espesor de aislamiento. Simulación durante 30 años. Resultados Wufi Pro 5.3

En conclusión, se observa que dependiendo del sistema de cerramiento que se haya dispuesto, el contenido total de agua en todos los casos baja, por lo que los cerramientos tendrían la capacidad de secar. No obstante esta curva no se vuelve horizontal hasta pasados 20 años en el caso de la fachada ventilada que nos ocupa en comparación con una fachada tradicional de granito que con 4 años ya se alcanza el equilibrio o incluso 2,5 años en el caso del hormigón. El aumento del espesor del aislamiento parece también retrasar que la curva se vuelva horizontal.

La influencia de otros soportes en la fachada ventilada

Las siguientes simulaciones hacen referencia a la pregunta sobre qué pasaría si la hoja interior fuese de otro material diferente al hormigón. Es de esperar que una fachada ventilada de granito pueda ser construida sobre una variabilidad de materiales de soporte. Se han realizado tres simulaciones suponiendo no sólo el soporte de hormigón sino también uno de ladrillo macizo y otro de ladrillo de arcilla expandida.

Contenido total de agua

Analizados los datos recogidos del contenido total de agua, se deduce claramente que los cerramientos de ladrillo en este sistema constructivo tienen una tendencia a poseer menos contenido total de agua y además tienen la capacidad de secado, siendo el soporte de ladrillo macizo el que más seco finaliza al paso de cinco años. Es, con creces, el cerramiento con el soporte de hormigón el que posee mayor contenido total de agua y es además el que seca menos con el paso del tiempo.

Parámetros otros soportes	Parámetros fijos 0-10-C3-F4	Inicio	Fin	Diferencia
	F.V. C3 C1 A Coruña soporte hormigón	21,9	19,4	-11,42%
	F.V. C3 C1 A Coruña soporte lad macizo	5,0	3,1	-38,0%
	F.V. C3 C1 A Coruña soporte lad arcilla exp	5,7	4,1	-28,1%

Tabla V.27: Resultados de la simulación al inicio y al final del contenido total de agua Kg/m² con tres soportes diferentes. Resultados Wufi Pro 5.3

El caso del contenido total de agua del ladrillo macizo

Finalmente se hace una simulación incorporando el ladrillo macizo en la hoja interior. Se realiza otra simulación incorporando más espesor en el poliuretano variando de 3cm a 30cm.

En la figura V.78 se observa que las oscilaciones anuales son diferentes y menos pronunciadas en el muro con 30cm de espesor de aislamiento con respecto al de 3cm

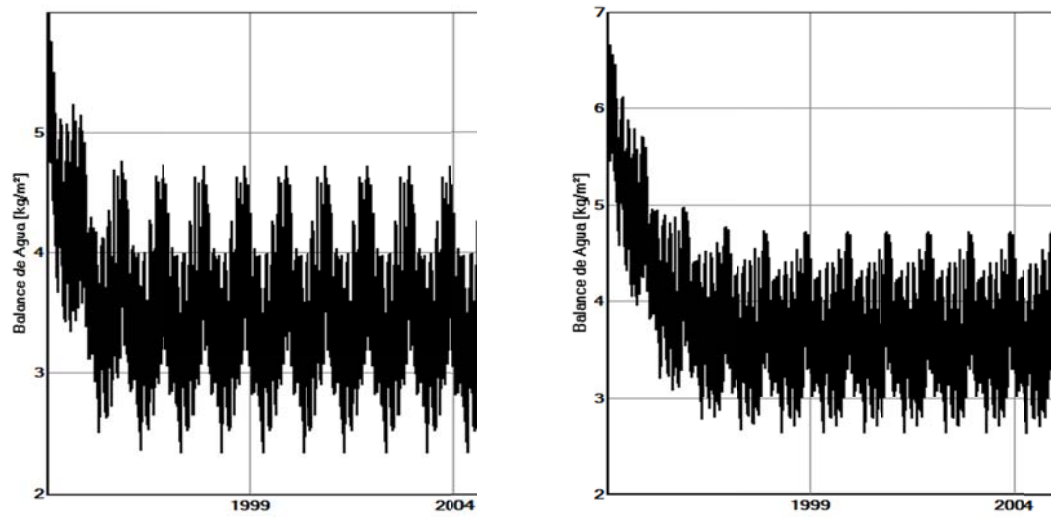


Figura V.78: Resultado del contenido total de agua en Kg/m^2 de la fachada ventilada con ladrillo macizo con 3cm de aislamiento y con 30cm de aislamiento. Resultados Wufi Pro 5.3

V.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LO LARGO DEL TIEMPO

La fachada ventilada de granito que se ha utilizado para estos estudios se ejecutó en el año 1995 y desde entonces sigue invariable en la actualidad. En los años 2008 y 2009, se recogieron datos de la fachada ventilada indicada. Sin embargo, esta es una lectura transversal, es decir, en un momento determinado, donde sólo podemos conocer los datos en un momento temporal. El prescriptor, sin embargo, se hace la pregunta de conocer cuál será el comportamiento a lo largo del tiempo y cuál sería la variabilidad de esos valores. Lógicamente los estudios reales del edificio pueden darnos información relevante. Pero con la simulación se podría conocer el comportamiento higrotérmico del cerramiento una vez pasados los años. En la actualidad el edificio lleva 20 años en uso.

Este apartado, por tanto, tiene como finalidad responder a la pregunta de qué sucede en el cerramiento a lo largo del tiempo. Para ello se realizó una simulación del cerramiento construido de **30 años** de duración desde el año 1995 al año 2025. El clima al que fue sometido el cerramiento se repitió anualmente. Los resultados obtenidos son analizados a continuación.

El contenido total de agua de la fachada ventilada a lo largo del tiempo

En la primera de las gráficas obtenida se muestra el contenido total de agua en Kg/m^2 . A los materiales se le han supuesto unas condiciones iniciales del 80% HR. Parece que a los 20 años la curva se vuelve una línea recta, es decir, se equilibra el tiempo de secado del cerramiento.

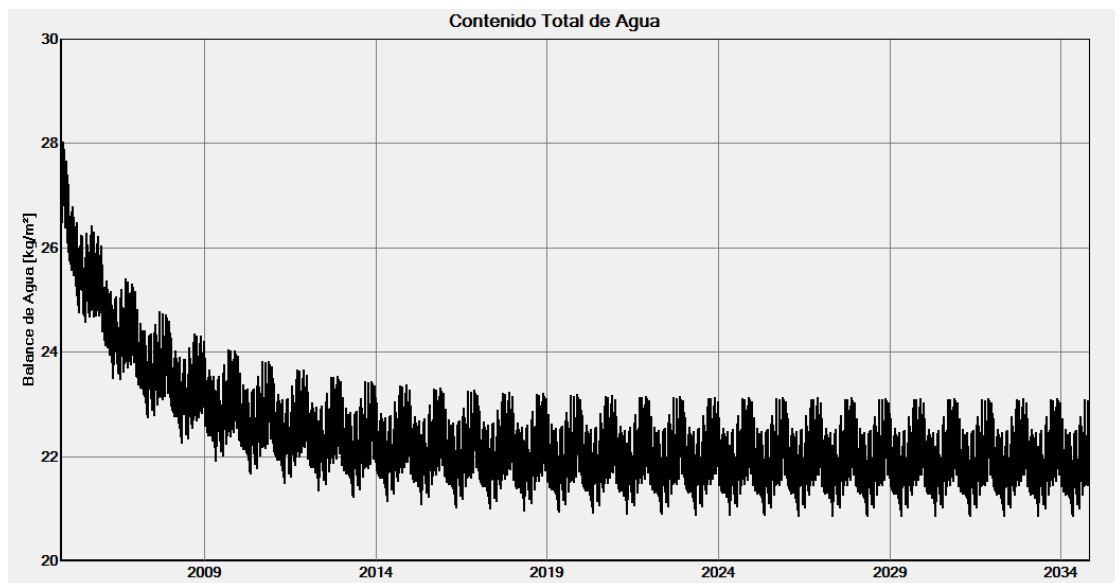


Figura V.79: Contenido total de agua Kg/m^2 de la fachada ventilada con 3cm de espesor de poliuretano. Simulación de 30 años. Cond iniciales 80% HR. Resultado Wufi Pro 5.3

Sin embargo, si consideramos el contenido inicial de agua en los materiales del cerramiento del 30% HR, parece que la curva no se vuelve horizontal hasta que pasen más años, es decir, el equilibrio se alcanza más tarde, parece que a los 25 años.

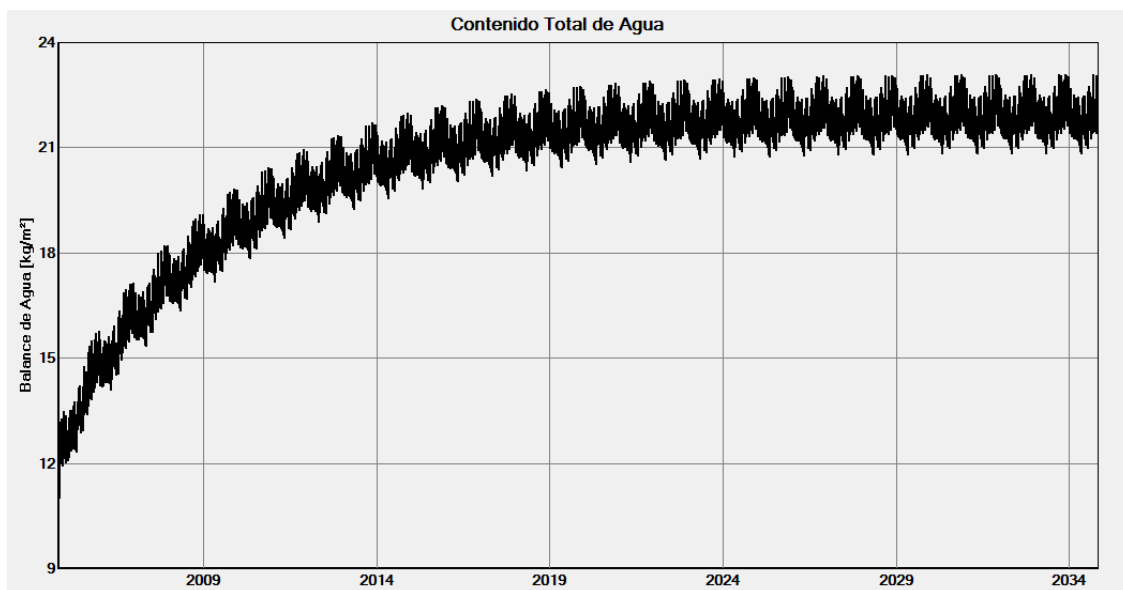


Figura V.80: Contenido total de agua de la fachada ventilada con 3cm de espesor de poliuretano. Simulación de 30 años. Cond iniciales 30% HR. Resultado Wufi Pro 5.3

Si analizamos los valores iniciales y finales recogidos en la tabla que abajo se representa, se observa como en la condición de humedad relativa inicial del 80% el valor mas inferior corresponde con los 30 años. En el caso de la humedad relativa inicial del 30% , sin embargo, el valor de contenido total de agua del cerramiento se produce a los 20 años.

Parámetros de humedad	Parámetros fijos 0-10-F4	Inicio	5años	20años	30años	Diferencia
relativa inicial	F.V. C3 C1 A Coruña HR=80%	21,9	19,4	17,5	17,3	-21,00%
	F.V. C3 C1 A Coruña HR=30%	9,5	13,8	16,4	16,8	+76,84%

Tabla V.28: Resultados del contenido total de agua en Kg/m^2 de la fachada ventilada de aislamiento de 3cm a lo largo del tiempo, según dos contenidos de humedad relativa inicial HR=80% y 30%. Resultados Wufi Pro 5.3

Esta es la fachada ventilada que ha sido colocada en la realidad pero **¿Qué pasaría si verdaderamente tuviese mas aislamiento térmico como por ejemplo 30cm?**

Para este supuesto, se realizó nuevamente dos simulaciones de 30 años con un espesor máximo de aislamiento térmico de poliuretano de 30cm y con contenido de humedad relativa inicial del 80% y del 30%

El contenido total agua del cerramiento con 30cm de espesor de poliuretano

En este caso, se observa que no ha llegado al equilibrio de secado, es decir, la asíntota de la gráfica aún no se ha puesto horizontal.

A continuación se expone la gráfica del contenido total de agua en Kg/m^2 para el cerramiento con 30cm de espesor de aislamiento térmico de poliuretano.

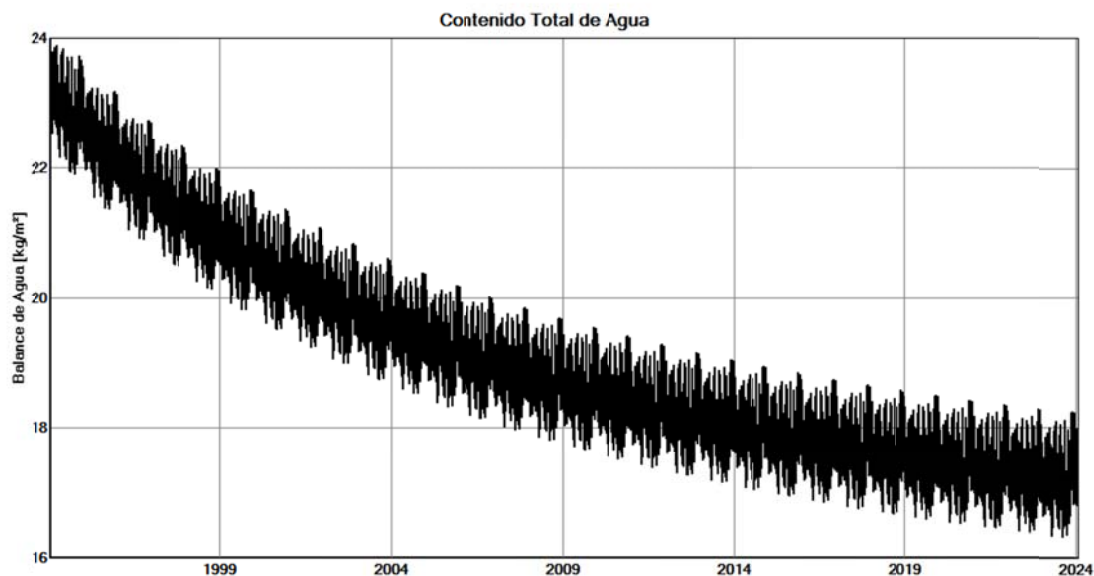


Figura V.81: Balance de agua del cerramiento con 30cm de espesor de poliuretano. HR=80%. Simulación de 30años
Resultado Wufi Pro 5.3

En la tabla V.29 se han reflejado los datos del contenido total de humedad en los diferentes años. El color azul indica que el cerramiento ha aumentado el contenido total de agua. Contrariamente, el color amarillo indica que el cerramiento a disminuido el contenido total de agua.

Parámetros de humedad	Parámetros fijos 0-10-F4	Inicio	5años	20años	30años	Diferencia
relativa inicial	F.V. C30 C1 A Coruña H=80%	22,4	20,6	17,6	16,8	-25,00%
	F.V. C30 C1 A Coruña H=30%	9,6	13,0	15,0	15,5	+61,46%

Tabla V.29: Resultados del contenido total de agua en Kg/m² de la fachada ventilada de aislamiento de 30cm a lo largo del tiempo, según dos contenidos de humedad relativa inicial HR=80% y 30%. Resultados Wufi Pro 5.3

Si se pone en contraste el cerramiento con las dos suposiciones de espesores diferentes de aislamiento y sometidos a la simulación de 30 años, es el cerramiento con mayor espesor de aislamiento el que llega a disminuir mas el contenido total de agua.

Parámetros de humedad	Parámetros fijos 0-10-F4	Inicio	5años	20años	30años	Diferencia
relativa inicial	F.V. C3 C1 A Coruña H=80%	21,9	19,4	17,5	17,3	-21,00%
	F.V. C30 C1 A Coruña H=80%	22,4	20,6	17,6	16,8	-25,00%

Tabla V.30: Resultados del contenido total de agua en Kg/m² de la fachada ventilada con aislamiento de 3 y 30cm a lo largo del tiempo, según dos contenidos de humedad relativa inicial HR=80%. Resultados Wufi Pro 5.3

Si el gráfico del contenido total de agua del cerramiento de 3cm se pone en comparación con el contenido total de agua del cerramiento con 30cm de aislamiento, se ha observado que el equilibrio de secado se produce en momentos diferentes, es decir, que el valor de contenido total de agua que llega a los 30 años el cerramiento con 3cm es mayor que el contenido de agua al que llega el cerramiento de 30cm.

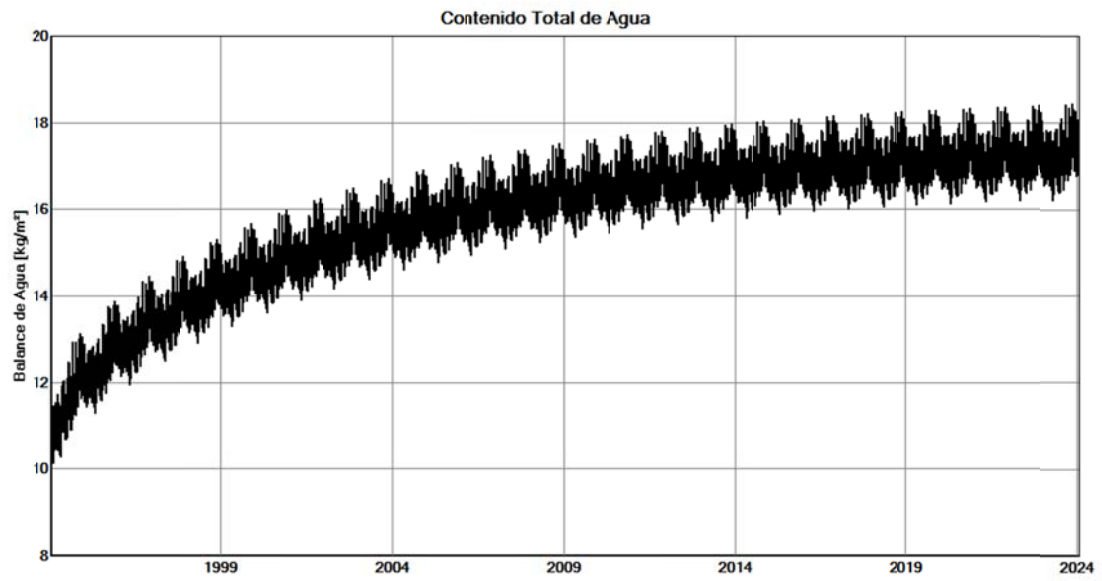


Figura V.82: Balance de agua del cerramiento con 30cm de espesor de poliuretano. HR=30%. Simulación de 30 años
Resultado Wufi Pro 5.3

V.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN EL MARCO NORMATIVO

Para el diseño de un cerramiento exterior es de aplicación el Documento Básico HS-1. Como se explicó en los capítulos precedentes, el procedimiento establecido definía la situación climática determinada, clasificada ésta, se correlacionaba con un grado de impermeabilidad a conseguir por el cerramiento. En el caso del grado de impermeabilidad máximo las condiciones posibles del cerramiento pueden ser extraídas de una tabla. Ver capítulo II

Si se analizan las condiciones para obtener la aceptación de la solución del Código para el máximo grado de impermeabilidad son las siguientes:

	R Resistencia a la filtración del revestimiento			B Resistencia a la filtración de la barrera contra la penetración de agua			C Composición de la hoja principal	
Tipo de fachada analizada	R1	R2	R3	B1	B2	B3	C1	C2
R3+C1			R3				C1	
B3+C1						B3	C1	
R1+B2+C2	R1				B2			C2
R2+B1+C1		R2		B1			C1	

Tabla V.31: Listado de ejemplos de tipos de cerramiento de fachada con grado de impermeabilidad 5

Con la información recogida de las condiciones y nivel de prestación (letras), se ha desarrollado un ejemplo concreto, proponiendo uno para cada uno de las cuatro diferentes soluciones aceptadas e indicadas para esta clasificación.

	TIPO DE CERRAMIENTO DE FACHADA ANALIZADO	
B3+C1	<p>HP hoja principal</p> <p>LC fábrica de ladrillo cerámico (perforado o macizo)</p> <p>BH fábrica de bloque de hormigón⁽¹⁰⁾ de áridos densos</p> <p>LHO fábrica de ladrillo perforado de hormigón⁽¹⁰⁾ de áridos densos perforado</p> <p>RM revestimiento intermedio⁽⁷⁾</p> <p>C cámara de aire no ventilada⁽⁹⁾</p> <p>SP separación de 10mm</p> <p>AT aislante no hidrófilo</p> <p>HI hoja interior</p> <p>LH fábrica de ladrillo hueco</p> <p>BH fábrica de bloque de hormigón</p> <p>YL placa de yeso laminado</p> <p>RI revestimiento interior formado por un enlucido, un enfoscado o un alicatado</p>	
R3+C1	<p>RE revestimiento exterior continuo</p> <p>HP hoja principal</p> <p>LC fábrica de ladrillo cerámico</p> <p>BH fábrica de bloque de hormigón⁽¹⁰⁾</p> <p>BC fábrica de bloque cerámico</p> <p>LHO fábrica de ladrillo perforado de hormigón⁽¹⁰⁾</p> <p>BP fábrica de bloque de picón⁽¹⁰⁾</p> <p>RM revestimiento intermedio (opcional)</p> <p>C cámara de aire no ventilada⁽⁹⁾</p> <p>SP separación de 10mm</p> <p>AT aislante no hidrófilo</p> <p>HI hoja interior</p> <p>LH fábrica de ladrillo hueco</p> <p>BH fábrica de bloque de hormigón</p> <p>BP fábrica de bloque de picón</p> <p>YL placa de yeso laminado</p> <p>RI revestimiento interior formado por un enlucido, un enfoscado o un alicatado</p>	
R1+B2+C2	<p>RE revestimiento exterior continuo</p> <p>AT aislante no hidrófilo</p> <p>HP hoja principal</p> <p>LC fábrica de ladrillo cerámico (macizo o perforado, cuando el AT se fije mecánicamente)</p> <p>BH fábrica de bloque de hormigón⁽⁸⁾</p> <p>BC fábrica de bloque cerámico</p> <p>LHO fábrica de ladrillo perforado de hormigón⁽⁸⁾</p> <p>BP fábrica de bloque de picón⁽⁸⁾</p> <p>RI revestimiento interior formado por un enlucido, un enfoscado o un alicatado</p>	

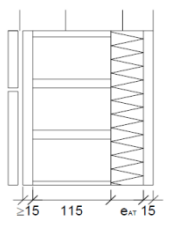
R2+B1+C1 Código F 6.3 C.T.E.	RE revestimiento exterior discontinuo HP hoja principal LC fábrica de ladrillo cerámico (perforado o macizo, cuando el RE se fije mecánicamente) BH fábrica de bloque de hormigón ⁽¹¹⁾ BC fábrica de bloque cerámico LHO fábrica de ladrillo perforado de hormigón ⁽¹¹⁾ BP fábrica de bloque de picón ⁽¹¹⁾ RM revestimiento intermedio (opcional) C cámara de aire no ventilada ⁽¹⁰⁾ SP separación de 10mm AT aislante no hidrófilo HI hoja interior LH fábrica de ladrillo hueco BH fábrica de bloque de hormigón BP fábrica de bloque de picón YL placa de yeso laminado RI revestimiento interior formado por un enlucido, un enfoscado o un alicatado	RE LC AT YL 

Tabla V.32: Cerramiento de fachadas elegidas del catálogo de elementos constructivos del C.T.E. v. marzo 2010 con el cumplimiento del Grado de Impermeabilidad 5 (C.T.E. DB HS-1)

Material	Peso específico	Porosidad	Calor específico	Conductividad térmica	Factor de resistencia a la difusión de vapor
	[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]
RE Rev. continuo ext. Lime Plaster	1600	0,33	850	0,7	12
RE Rev. discontinuo Plaqueta granito	2453	0,095	702	1.66	54
LC Fábrica de ladrillo cerámico perf. Brick H	1891	0,28	860	0.955	14
LC Fábrica de ladrillo cerámico macizo Solid brick masonry	1900	0,24	850	0,6	10
AT Poliuretano de celda cerrada	39	0,99	1470	0,025	88,93
LH Fábrica de ladrillo hueco Brick 800	765	0,6	850	0.158	15
YL Placa de yeso laminado Fermacell Gypsum-Fibreboard	1153	0,53	1200	0,32	16
BH Fábrica de bloque de hormigón Concrete blocks, pumice aggregate	664	0,67	850	0,14	4
RI Enlucido enfoscado int. Interior plaster with pearlite	338	0,87	850	0,03	6,2
Mortero para fijación Lime cement mortar, coarse	1910	0,25	850	0,8	45,89

Tabla V.33: Propiedades de los materiales componentes de los cerramientos. Fuente: Catálogo de elementos constructivos del C.T.E. V. marzo 2010

La comprobación que se ha realizado establece que, a pesar de ser diferentes soluciones, deberían tener un similar y beneficioso comportamiento higrotérmico en el más alto grado de impermeabilidad. El Código no tiene especificado un método de verificación que permita comprobar si se han conseguido las prestaciones del cerramiento. Sin embargo, se hace referencia a la EN 15026:2007 como método alternativo para la evaluación higrotérmica. Se ha utilizado, pues, el análisis numérico de simulación.

En primer lugar se han hecho unas simulaciones sobre la influencia de considerar en un cerramiento el aislamiento por la cara exterior o por la cara interior y cómo esto repercute en el contenido total de agua.

Se realizaron, por tanto, diferentes simulaciones utilizando la solución de fachada ventilada, colocando el aislamiento por la cara exterior de la hoja principal de hormigón, como es la solución en la realidad y disponiendo éste en la cara interior de la hoja principal de hormigón. Además del poliuretano o PU, también se utilizó otro tipo de aislamiento, en este caso, de poliestireno extrusionado o XPS. Los resultados se muestran representadas en las figuras. Independientemente de sus características como aislantes, el contenido total de agua del cerramiento, cuando es colocado por el interior, tiene mayor cantidad de agua, siendo incluso la solución con el XPS el cerramiento más húmedo. En el caso del aislamiento por la cara exterior de la hoja principal se reduce considerablemente el contenido total de agua. Prácticamente el comportamiento es indiferente entre utilizar XPS o PU

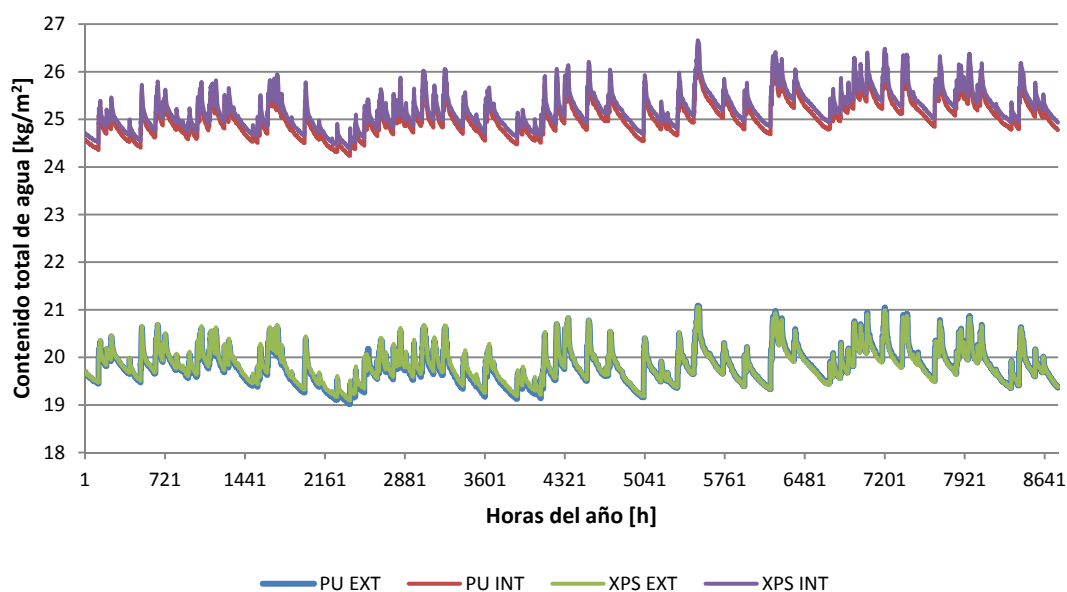


Figura V.83: Contenido total de agua a lo largo de un año de PU y XPS con posiciones interior y exterior del aislamiento de la fachada ventilada de granito. Resultados Wufi Pro 5.3

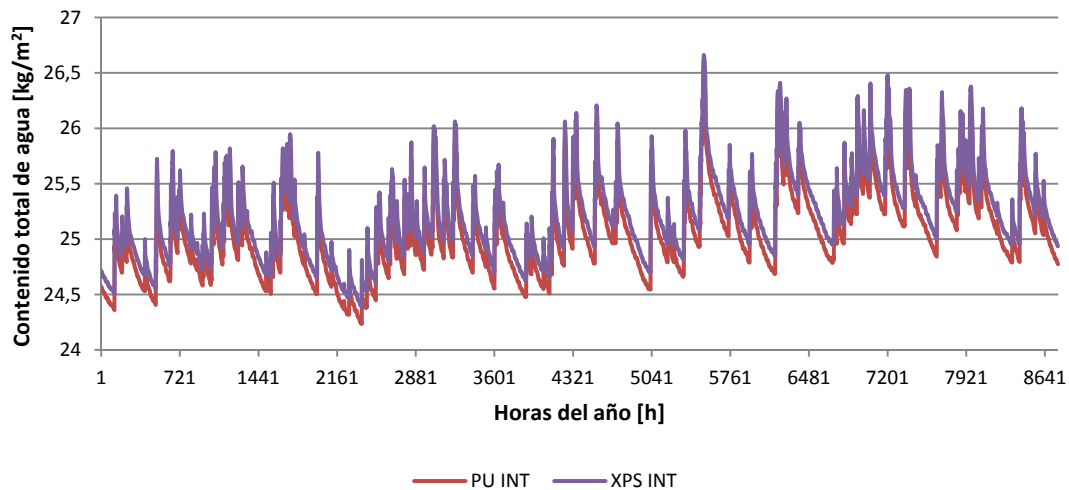


Figura V.84: Contenido total de agua a lo largo de un año de PU y XPS en posición interior del aislamiento de la fachada ventilada de granito. Resultados Wufi Pro 5.3

Puede ser analizado con detenimiento cada uno de los comportamientos. En este caso, la figura V.85 indica el contenido total de agua en el último año de la simulación con la solución del aislamiento en la posición exterior.

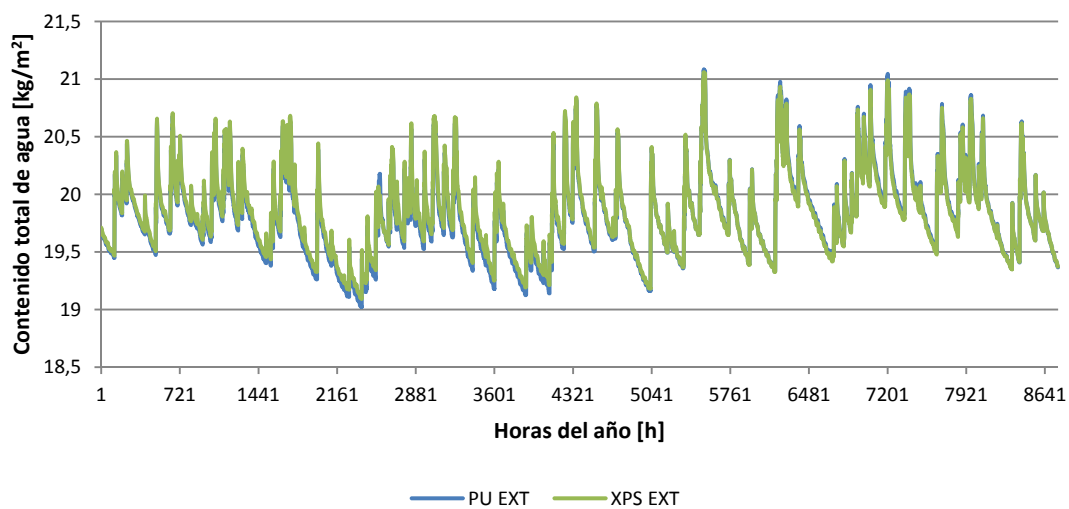


Figura V.85: Contenido total de agua a lo largo de un año de PU y XPS en posición exterior del aislamiento de la fachada ventilada de granito. Resultados Wufi Pro 5.3

Se concluye para estas simulaciones que, para el clima analizado, es determinante la posición del aislamiento ya que se obtendrá un cerramiento con menos contenido de agua y, por lo tanto, los materiales estarán sometidos a menor cantidad de agua, que puede suponer un deterioro e incremento económico debido a la pérdida de energía.

A continuación se procede a representar los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas de los cuatro tipos de cerramiento para el grado de impermeabilización 5.

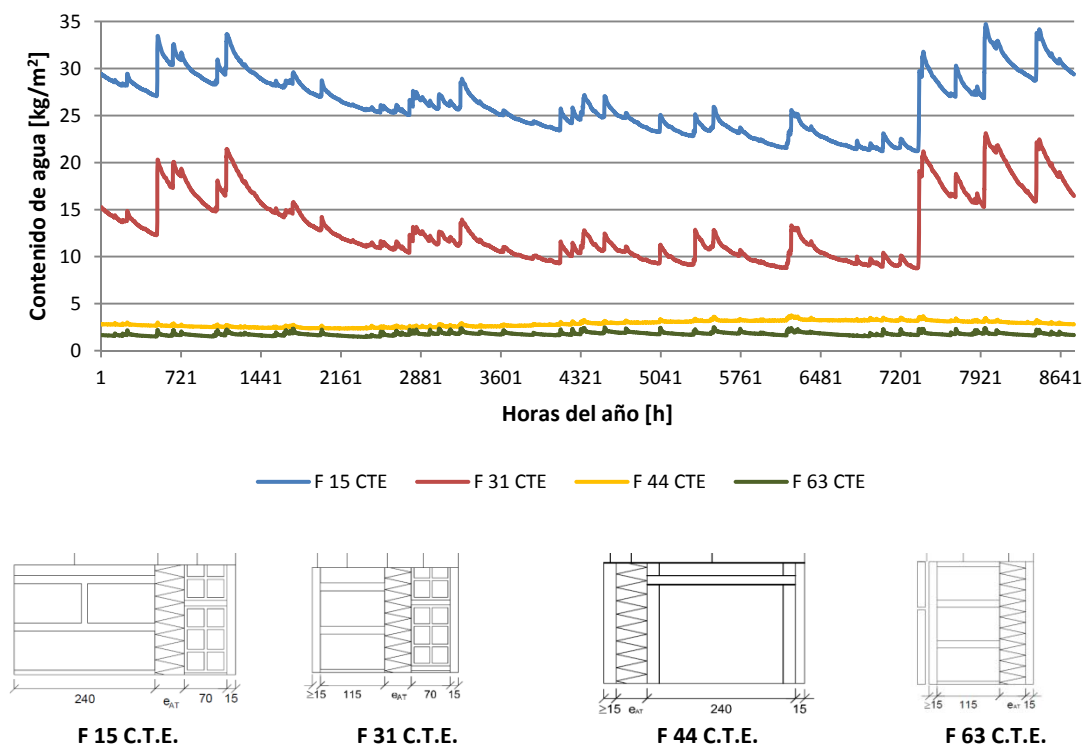


Figura V.86: Contenido de agua del último año de simulación de los cuatro cerramientos analizados que cumplen con GI 5 del C.T.E. Resultados Wufi Pro 5.3

De la figura V.86 de contenido total de agua se observa la tendencia de comportamientos hídricos de dos tipos, los que poseen una gran cantidad y los que poseen menor cantidad. Las soluciones del cerramiento con el aislamiento en el medio son los que tienen mayor contenido de agua. Por el contrario, la disposición del aislamiento al interior o al exterior ha producido comportamientos con bajos contenidos de agua. De hecho entre valores obtenidos en el último año de simulación existe una variación puntual máxima de un 1750% más de contenido de agua entre el tipo de cerramiento más seco y el más húmedo.

En el caso del análisis de los valores de transmitancia térmica la figura siguiente manifiesta que el cerramiento con valores más bajos de transmitancia térmica valor-U es F 44 C.T.E., el que tiene el aislamiento por la cara exterior de la hoja principal. Su hoja principal es de bloque de hormigón. Sin embargo, los valores más bajos se producen en verano cuando prácticamente no existe necesidad de consumo de energía, incluso para la refrigeración. A pesar de esto, los mayores valores del año son obtenidos en invierno pero son los más bajos de los cuatro cerramientos analizados. De hecho, tiene una gran amplitud de variación del valor de transmitancia térmica a lo largo del año.

Por el contrario el cerramiento F 63 C.T.E. es el que menor amplitud de valor tiene a lo largo del año, siendo una línea bastante más tendida y además dando los valores más altos, en general, a lo largo de todo el año. Además, este cerramiento, por su composición produce condensaciones intersticiales. Los dos tipos de cerramiento restantes F 31 C.T.E. y F 15 C.T.E. son los que se comportan de manera muy similar. La amplitud es intermedia entre los mayores

valores producidos en invierno y los de verano. De hecho los meses de noviembre y diciembre son los que se obtiene los peores valores de los cuatro cerramientos analizados.

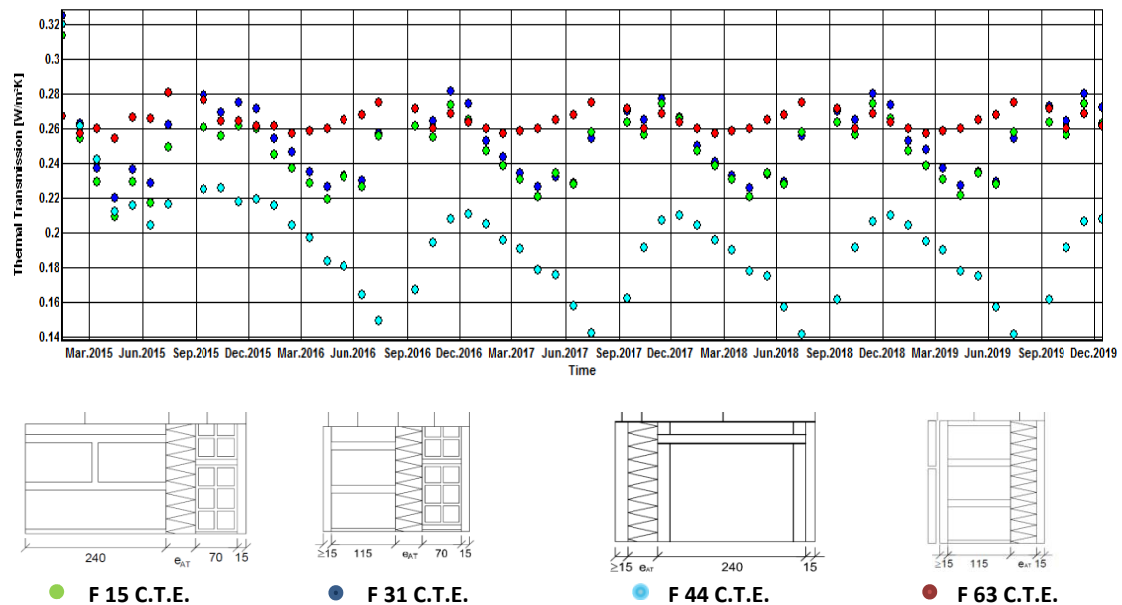


Figura V.87: Resultado de la transmitancia térmica dinámica mensual de los cinco años de simulación para los cuatro cerramientos analizados que cumplen con GI 5 del C.T.E. Resultados Wufi Pro 5.3

El mejor comportamiento a nivel de transmitancia térmica ha sido la solución F 44 C.T.E., dando valores calculados de transmitancia térmica al 80% de humedad relativa similar a los obtenidos dinámicamente en cada mes del año. De hecho, es también uno de los cerramientos que tiene menos contenido de agua.

Finalmente como conclusión del capítulo se hace una hoja resumen con todos los valores del contenido total de agua kg/m^2 al inicio y al final de la simulación en toda la variación de parámetros.

Variación del **contenido total de agua (Kg/m²)** de la fachada entre el inicio de la simulación y el final, **(al cabo de cinco años)**, según los siguientes parámetros variables.

Parámetros de espesor de aislamiento de poliuretano	Parámetros fijos 0 -10	Inicio	Fin	Diferencia
	Sin aislamiento	21,8	21,2	-2,75%
	C3 Aislamiento 3cm de poliuretano	21,9	19,4	-11,42%
	C9 Aislamiento 9cm de poliuretano	22,0	19,4	-11,81%
	C11 Aislamiento 11cm de poliuretano	22,0	19,5	-11,36%
	C15 Aislamiento 15cm de poliuretano	22,1	19,8	-10,41%
	C30 Aislamiento 30cm de poliuretano	22,4	20,6	-8,04%

Parámetros de lluvia incidente	Parámetros fijos C3-C2-10	Inicio	Fin	Diferencia
	F1 ASHRAE $F_E = 0,7$; $F_D = 0,5$	21,9	18,8	-14,16%
	F2 ASHRAE $F_E = 1,0$; $F_D = 0,5$	21,9	19,0	-13,24%
	F3 ASHRAE $F_E = 1,0$; $F_D = 1,0$	21,9	19,2	-12,33%
	F4 ASHRAE $F_E = 1,0$; $F_D = 2,0$	21,9	19,3	-11,87%
	0 ASHRAE $F_E = 1,4$; $F_D = 2,0$	21,9	19,4	-11,42%

Parámetros según zona climática	Parámetros fijos 10	Inicio	Fin	Diferencia
	C3 A3 Málaga	21,9	17,6	-19,63%
	C3 B3 Palma de Mallorca	21,9	18,9	-13,70%
	C3 C1 A Coruña	21,9	19,4	-11,42%
	C3 C2 Barcelona	21,9	18,8	-14,16%
	C3 D3 Madrid	21,9	17,6	-19,63%
	C9 A3 Málaga	22,0	18,0	-18,18%
	C9 B3 Palma de Mallorca	22,0	19,1	-13,18%
	C9 C1 A Coruña	22,0	19,4	-11,82%
	C9 C2 Barcelona	22,0	18,9	-14,09%
	C9 D3 Madrid	22,0	17,9	-18,64%

Parámetros de ratio de intercambio de aire [renovaciones/hora]	Parámetros fijos 0-F4	Inicio	Fin	Diferencia
	s/ventilación	21,9	19,8	-9,41%
	10	21,9	19,4	-11,42%
	20	21,9	18,7	-14,61%
	50	21,9	18,0	-17,81%
	100	21,9	17,7	-19,18%
	200	21,9	17,6	-19,63%
	857	21,9	17,5	-19,92%

Parámetros de espesor de granito	Parámetros fijos 0-10-C3-F4	Inicio	Fin	Diferencia
	1,5cm	21,8	18,9	-13,30%
	3cm	21,9	19,4	-11,42%
	6cm	22,1	20,1	-9,05%

Parámetros de espesor de cámara de aire	Parámetros fijos 0-10-C3-F4	Inicio	Fin	Diferencia
	2cm	21,8	19,4	-11,36%
	5cm	21,9	19,4	-11,42%
	9cm	22,0	19,3	-12,29%
	15cm	22,1	19,1	-13,63%

Parámetros de orientación	Parámetros fijos 0-10-C3-F4	Inicio	Fin	Diferencia
	Norte	21,9	19,4	-11,42%
	Sur	21,9	19,2	-11,42%
	Este	21,9	19,3	-11,42%
	Oeste	21,9	19,3	-11,42%

Parámetros otros soportes	Parámetros fijos 0-10-C3-F4	Inicio	Fin	Diferencia
	F.V. C3 C1 A Coruña soporte hormigón	21,9	19,4	-11,42%
	F.V. C3 C1 A Coruña soporte lad macizo	5,0	3,1	-38,0%
	F.V. C3 C1 A Coruña soporte lad arcilla exp	5,7	4,1	-28,1%

Parámetros de humedad relativa inicial	Parámetros fijos 0-10-F4	Inicio	5años	20años	30años	Diferencia
	F.V. C3 C1 A Coruña H=80%	21,9	19,4	17,5	17,3	-21,00%
	F.V. C3 C1 A Coruña H=30%	9,5	13,8	16,4	16,8	+176,84%
	F.V. C30 C1 A Coruña H=80%	22,4	20,6	17,6	16,8	-25,00%
	F.V. C30 C1 A Coruña H=30%	9,6	13,0	15,0	15,5	+161,46%

Parámetros de tiempo	Parámetros fijos 0-10-F4	Inicio	1año	3años	5años	20años	30años	Diferencia
	Fachada tradicional de granito	4,2	11,08	13,7	13,8	13,8	13,8	+330,30%
	F.V. C3 C1	21,9	--	--	19,4	17,5	17,3	-21,00%
	C3 Ladrillo macizo	5,0	3,4	3,1	3,1	3,1	3,1	-38,00%
	F.V. C30 C1	22,4	--	--	20,6	17,6	16,8	-25,00%
	C30 Ladrillo macizo	5,4	4,1	3,3	3,2	3,2	3,2	-40,7%

Posición Aislamiento	Parámetros	Inicio	Fin	Diferencia
PU	Exterior	21,9	19,4	-11,42%
	Interior	21,9	24,8	+113,42%
XPS	Exterior	21,9	19,4	-11,42%
	Interior	21,9	24,9	+113,89%

Grado de Impermeabilidad GI 5	Parámetros soluciones constructivas	Inicio	Fin	Diferencia
Solución del catálogo de elementos constructivos C.T.E.	F 1.5 C.T.E.	6,1	29,4	+479,28%
	F 3.1 C.T.E.	4,2	16,5	+387,97%
	F 4.4 C.T.E.	7,8	2,8	-63,87%
	F 6.3 C.T.E. (tiene condensaciones interst)	0,9	1,7	+173,68%

Propiedades materiales	Parámetros	Inicio	Fin	Diferencia
Granito	GR IBP Base de Datos	21,9	19,4	-11,42%
	GR EN 12524	21,9	19,4	-11,42%
	GR Freitas	21,9	19,3	-11,42%

Poliuretano	PU IBP Base de Datos	21,9	19,4	-11,42%
	PU EN 12524	21,9	19,5	-10,96%
	PU Marechal	21,9	19,4	-11,42%
Hormigón	HOR IBP Base de Datos	21,9	19,4	-11,42%
	HOR Masea Base de Datos	27,9	23,8	-14,70%
	HOR EN 12524	21,9	18,9	-13,70%

Tabla V.34: Resumen de las simulaciones efectuadas con Wufi Pro 5.3.

	Incremento del contenido total de agua en porcentaje %
	Decremento del contenido total de agua en porcentaje %
	Simulación con los mismos parámetros

V.6 SÍNTESIS CRÍTICA DE RESULTADOS DEL CAPÍTULO V

En este capítulo V de análisis numérico de simulación, se ha procedido a recoger los 62 ensayos de análisis de sensibilidad realizados que daban respuesta al objetivo de estimar la variabilidad e influencia de los parámetros materiales, de diseño y ambientales sobre el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor y el conocimiento de la transmitancia térmica.

En particular, se procedió a identificar los parámetros relativamente sensibles. Se evaluó, mediante análisis de sensibilidad, los efectos producidos por los cambios realizados sobre el sistema de cerramiento sus condiciones de contorno. Y finalmente analizar el proceso de mojado y secado de la fachada ventilada a los largo del tiempo.

Con respecto a la **caracterización del cerramiento**, y desde el punto de vista de temperaturas, es el aislamiento el que reduce la amplitud diaria de temperaturas superficiales, siendo casi inapreciable esa diferencia en la temperatura superficial del hormigón y de la superficial interior. Las variaciones máximas se han producido en la superficie exterior del aplacado de granito.

En el caso hídrico, se ha detectado que la humedad relativa superficial interior del aplacado de granito es superior a la superficial exterior. La variabilidad diaria de humedad relativa en el hormigón y en la superficie interior es inapreciable. Por el contrario, las grandes variaciones se producen entre el aplacado de granito y hasta el poliuretano incluido. Con el análisis de la gráfica de contenido total de agua, no se ha procedido al equilibrio hídrico tras la simulación de cinco años. Se ha obtenido que existe riesgo de condensaciones intersticiales en cuatro meses del año: diciembre, enero, febrero y marzo.

Los análisis de simulación realizados para la fachada ventilada de granito de juntas abiertas se centraron en diferentes parámetros ambientales y de materiales expuestos:

1. El ambiente:

En el análisis del **clima** en las localizaciones de Málaga, Palma de Mallorca, A Coruña, Barcelona y Madrid, los resultados mostraron que los climas de Madrid y Málaga son los que menor contenido de humedad en Kg/m^3 tuvieron al final de la simulación. En esta situación no influyó que el cerramiento variase de espesor del aislamiento entre 3cm y 15cm, y que incluso no lo tuviese. La localización de A Coruña se ha advertido con el mayor contenido total de agua y variabilidad a lo largo del año de todas las localizaciones estudiadas.

Para la misma fachada ventilada de granito y con orientación norte, se han observado valores de transmitancia térmica que difieren en más del 10% entre la localización con menor contenido total de agua Madrid y con la de mayor contenido total de agua, A Coruña.

Se detectó también que para cumplir las especificaciones actuales C.T.E. DB HE-1 2013, poliuretano de espesor 9cm, existieron seis meses en los que el valor U mensual fue superior al máximo valor estático indicado. Se debería realizar un cerramiento con espesor de 15cm para poder cumplir en todos los meses ese valor máximo.

En el análisis de las cuatro **orientaciones**, sólo se extrae que la reducción de la variación del contenido de humedad es ligeramente mayor en el Sur, Este y Oeste que en el Norte.

En las simulaciones de **lluvia incidente** realizadas según las diferentes cuantías de lluvia de ASHRAE, la mayor cantidad de contenido de agua en el cerramiento se da en el supuesto más desfavorable en cantidad de lluvia. Se ha advertido también la correlación con el empeoramiento de los valores de transmitancia térmica calculados mensualmente.

2. En el caso de los materiales componentes del sistema de fachada ventilada de granito en la localización de A Coruña C1:

Al estudiar la variación del contenido total de agua en Kg/m^2 al cabo de cinco años obtenida con respecto a la variación del espesor del **aislamiento de poliuretano**, los resultados recogidos indicaron que el cerramiento con el espesor de 30 cm es el que menos redujo el contenido total de agua al final de los cinco años, con variaciones máximas y mínimas que oscilaron entre el 8 y el 12%. El cerramiento sin aislamiento es el que menos redujo su contenido total de agua al final de la simulación, con sólo una reducción de un 2,75%.

Si se analiza el contenido de agua en Kg/m^3 del poliuretano, son los espesores más pequeños los que tienen las mayores oscilaciones de contenido de agua entre 2 y 4Kg/m^3 . Por el contrario, en el poliuretano con 30cm de espesor no se advierte variaciones oscilatorias.

Contrastados los valores-U estáticos, 80% de humedad y mensual en los diferentes espesores de aislamiento, se ha advertido que existen entre 3 y 4 meses en los que los valores mensuales son inferiores al valor-U 80% y se corresponden con los meses de verano. Los 8, 9 meses restantes, los valores mensuales son superiores al valor estático obtenido del 80% de humedad relativa. El comportamiento del valor-U mensual a lo largo del año es sinusoidal, correspondiendo inversamente su amplitud con el espesor de aislamiento.

La variación del contenido total de agua en la **cámara de aire** para 10 renovaciones por hora en las diferentes situaciones climáticas advierte que la localización de A Coruña posee mayores valores de contenido de humedad a lo largo de todo el año. Variando el espesor de la cámara es con la cámara de mayor espesor la que provoca el secado, con una diferencia de reducción del contenido total de agua del cerramiento del 10,09% para un espesor de 1,5cm y un 14,09% para un espesor de 9cm. En el valor-U analizado existe una reducción del 26,56% entre 1,5 de espesor y la de 9cm.

La influencia del aumento del **espesor del granito** en el mayor contenido total de humedad es positiva, teniendo más agua el cerramiento con mayor espesor de granito.

Se realizaron análisis de sensibilidad variando **los materiales de la hoja interior**. Las tres simulaciones realizadas, de hormigón, de ladrillo macizo y de arcilla expandida. Los estudios de ladrillo y arcilla poseen valores de contenidos totales de humedad al final del año muy similares. Por el contrario, elegir el hormigón en esta solución se ha

advertido como un material que hace mantener una gran cantidad de humedad en el cerramiento.

En el caso de una **simulación a lo largo de los años** de este sistema constructivo, la estabilización del contenido total de agua en Kg/m^2 del cerramiento es muy rápida en los cerramientos con el material ladrillo en su hoja interior, alrededor de 3 años. En el caso del hormigón elegido, se ha detectado la lentitud en el equilibrio hídrico del cerramiento, alrededor de 20 años, donde la asíntota de la curva gráfica se vuelve horizontal.

En cuanto a la sensibilidad en el marco normativo se ha observado que para este clima la posición del aislamiento es relevante para mejorar el comportamiento higrotérmico, en este caso, reduciendo su contenido de agua cuando el aislamiento se sitúa por fuera y aumentándolo cuando el aislamiento se dispone por el interior.

Se resume que la clasificación climática es determinante en el contenido total de agua del cerramiento al final de la simulación, correlacionando más contenido total de agua en localizaciones con más lluvia incidente y humedad relativa ambiental. Se pone de manifiesto la proporcionalidad entre humedad ambiental y humedad en el cerramiento, así como entre ésta y el valor de la transmitancia: a mayor humedad mayor conductividad térmica.

En el caso de los materiales, el tipo de hormigón en la hoja interior del cerramiento empeora grandemente el contenido de humedad. Asimismo, el aumento del espesor de poliuretano también hace incrementar el contenido de humedad. La reducción del mismo supone la elección de otro material en la hoja interior como el ladrillo. El hormigón de caracterización elegido ha obtenido un equilibrio hídrico pasado mucho tiempo.

V.6 CRITICAL SYNTHESIS OF CHAPTER V

In this chapter V, 62 tests of numerical simulation analysis were performed to answer the objective of estimating the influence of the material, design and environmental parameters on the behavior of the density of heat flux rate and thermal transmittance.

In particular, relatively sensitive parameters were identified. Effects produced by changes made to the envelope system were evaluated. Finally wetting and drying process of the ventilated façade over time were also analyzed.

With respect to **envelope characterization**, and from the point of view of temperatures, insulation reduces daily amplitude of surface temperatures, being almost negligible that difference in the surface temperature of the concrete and the interior surface. In granite exterior surface, maximum variations have occurred.

In hydric analysis, internal surface relative humidity of granite veneer has been detected superior to the exterior surface. The daily variability of relative humidity in the concrete and the interior surface is negligible. On the contrary, the great variations occur between granite veneer and even the included polyurethane. Total water content analyzed has shown that no water balance was performed after the five-year simulation. A risk of interstitial condensation in four months of the year: December, January, February and March has been found.

Simulation analyzes performed for open-joint ventilated granite façade focused on different environmental parameters and materials:

1. Environment:

In **climate** analysis, results of Málaga, Palma de Mallorca, A Coruña, Barcelona and Madrid locations, showed that climates of Madrid and Málaga are the ones with the lowest water content in Kg/m^3 at the end of the simulation. Envelope with insulation thickness variation between 3cm and 15cm did not influence water content. Location of A Coruña has been noticed with the highest total water content and variability throughout the year of all the studied locations.

For the same open-joint ventilated façade and with north orientation, thermal transmittance values have been observed that differ by more than 10% between location with the lowest total water content Madrid and the highest total water content, A Coruña.

An insulation thickness of 15cm was detected as being able to meet current specifications of thermal transmittance at C.T.E. DB HE-1 2013 in every month. In fact with polyurethane thickness of 9 cm, there were six months in which the monthly U value was higher than the maximum indicated static value.

In four **orientation** analysis, reduction of moisture content is slightly higher in the South, East and West than in the North was found.

Rainfall simulations performed according to the different **amounts of rainfall** of ASHRAE requirements showed that the greatest amount of water content in the envelope occurs in the

most unfavorable scenario of high rainfalls. Correlation with the worsening of the monthly thermal transmittance values has also been noted.

2. In the case of materials of the ventilated granite façade system at the location of A Coruña C1:

When studying total water content variation in kg/m^2 after five years with respect to the variation of the thickness of the **polyurethane insulation**, the collected results showed that the envelope with the thickness of 30 cm is the one that reduced the least total water content at the end of the five years, with maximum and minimum variations ranging from 8 to 12%. The envelope without insulation is the one that least reduced its total water content at the end of the simulation, with only a reduction of 2.75%.

If polyurethane water content in Kg/m^3 is analyzed, results showed that the smallest thicknesses have the largest water content oscillations between 2 and 4 kg/m^3 . On the contrary, in the polyurethane thickness of 30cm does not notice oscillatory variations.

In contrast to the static U-values, 80% humidity and monthly in the different insulation thicknesses, it has been noticed that there are between 3 and 4 months in which the monthly values are inferior to the U-value 80% and correspond to summer months. The remaining 8, 9 months, monthly values are higher than static value obtained from 80% relative humidity. The behavior of the monthly U-value throughout the year is sinusoidal, inversely corresponding to its amplitude with the insulation thickness.

Variations of total water content in the **air cavity** with 10 renovations per hour in the different climatic situations indicate that A Coruña has higher values of water content throughout the year. By varying thickness of the cavity, it is the cavity with the greatest thickness that causes drying, with a difference of the total water content reduction of the envelope of 10,09% for a thickness of 1,5cm and 14,09% for a thickness of 9cm. In the analyzed U-value there is a reduction of 26,56% between 1,5 and 9cm thickness.

Increasing **granite thickness**, increasing greater total content of humidity will occur; with greater granite thickness, envelope will have more water.

Sensitivity analyzes were performed by altering **materials of the inner layer**. Three simulations of concrete, solid brick and expanded clay showed that brick and clay studies have very similar values of total water content at the end of the year. On the contrary, choosing a particular concrete in this assembly has been warned as a material that makes maintain a great amount of humidity in the envelope at the end of the simulation.

In the case of a **simulation over the years**, when an envelope with brick material in its inner sheet is made of, stabilization of total water content in Kg/m^2 has shown around 3 years. In the case of the concrete chosen, the slowness in the water balance of the envelope has been detected; it took around 20 years where the asymptote of the graphic curve becomes horizontal.

Regarding the sensitivity in the regulatory framework, it has been observed that for this climate the position of the insulation is relevant to improve the hygrothermal behavior, in this

case, reducing its water content when the insulation is placed outside and increasing when the insulation is on the interior part.

It is summarized that climatic classification is crucial in total water content of the envelope at the end of the simulation, correlating more total water content in locations with more incident rainfall and high relative humidity environment. Proportionality between relative humidity and humidity in the envelope has been shown, as well as thermal transmittance value: the higher the humidity, the higher the thermal conductivity.

In the case of materials, selected type of concrete in the inner layer of the assembly greatly worsens water content. Likewise, increasing polyurethane thickness also increases water content. Brick in the inner layer has been raised as adequate choice for reducing total water content. The chosen concrete has obtained long hygric equilibrium.

VI

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MONITORIZACIÓN Y ANÁLISIS NUMÉRICO

Durante el desarrollo de este capítulo VI, los resultados que se han obtenido y se han descrito en los capítulos IV y V precedentes son ahora analizados de forma comparada. Por ello, el objetivo principal de este capítulo trata de verificar y comparar esos resultados térmicos e hídricos obtenidos según los métodos utilizados. En concreto, y como objetivos específicos se trata de:

- . El primer objetivo trata de desarrollar un conjunto de pruebas de verificación y contraste alternativas que den respuesta y que argumenten los resultados obtenidos
- . El segundo objetivo específico trata de evaluar la validez de los resultados obtenidos en la monitorización higrotérmica

Debido a la complejidad del estudio y para evaluar la validez de los resultados obtenidos y entender el comportamiento higrotérmico, se ha considerado conveniente dar respuestas a las preguntas planteadas tras los resultados mediante el diseño y consecución de un conjunto de pruebas experimentales añadidas a las principales, que aquí se han denominado pruebas de verificación y contraste. Además la literatura concreta en este enfoque higrotérmico de investigación aplicada no es abundante, no es fácil y es a mi juicio escasa. Ello pudiera ser debido también a mis limitaciones lingüísticas.

- . En tercer lugar se pretende confrontar los valores de cuantificación hídrica y de la transmitancia térmica de la fachada ventilada según los diferentes métodos utilizados y la simulación

Estos objetivos específicos son respondidos a lo largo de este capítulo a través de la siguiente estructura. Ésta se divide en dos partes. La primera recoge todas las pruebas de contraste y verificación que se han realizado para poner proceder a la comparación de los resultados obtenidos en las monitorizaciones higrotérmicas de la fachada ventilada. Se han realizado 16 pruebas sobre todo en cerramientos a las que se añaden cinco pruebas más sobre el proceso de secado y mojado. El apartado explica el objetivo que tuvo cada prueba, el procedimiento

seguido, las variables recogidas y los principales resultados y conclusiones extraídas de cada prueba. Puede verse en el mapa conceptual seguido, las preguntas planteadas y los experimentos que han dado respuesta a ellas, así como el proceso seguido de reducción de la incertidumbre.

La segunda parte del capítulo se centra en comparar las distintas pruebas, las simulaciones numéricas realizadas y las monitorizaciones higrotérmicas con el fin de evaluar la relación existente entre los métodos de análisis para el comportamiento higrotérmico

El capítulo remata con una síntesis crítica en la que recoge los mayores hallazgos y los resultados más relevantes de esa comparativa.

VI.1 VERIFICACIÓN DE PROCESOS Y ENSAYOS

A continuación, se procede a describir los ensayos complementarios denominados pruebas de verificación y medida que fueron realizados para verificar que los datos habían sido tomados adecuadamente, así como para responder a las pequeñas preguntas que fueron planteadas durante el proceso de investigación. El procedimiento seguido puede observarse en este diagrama conceptual siguiente.

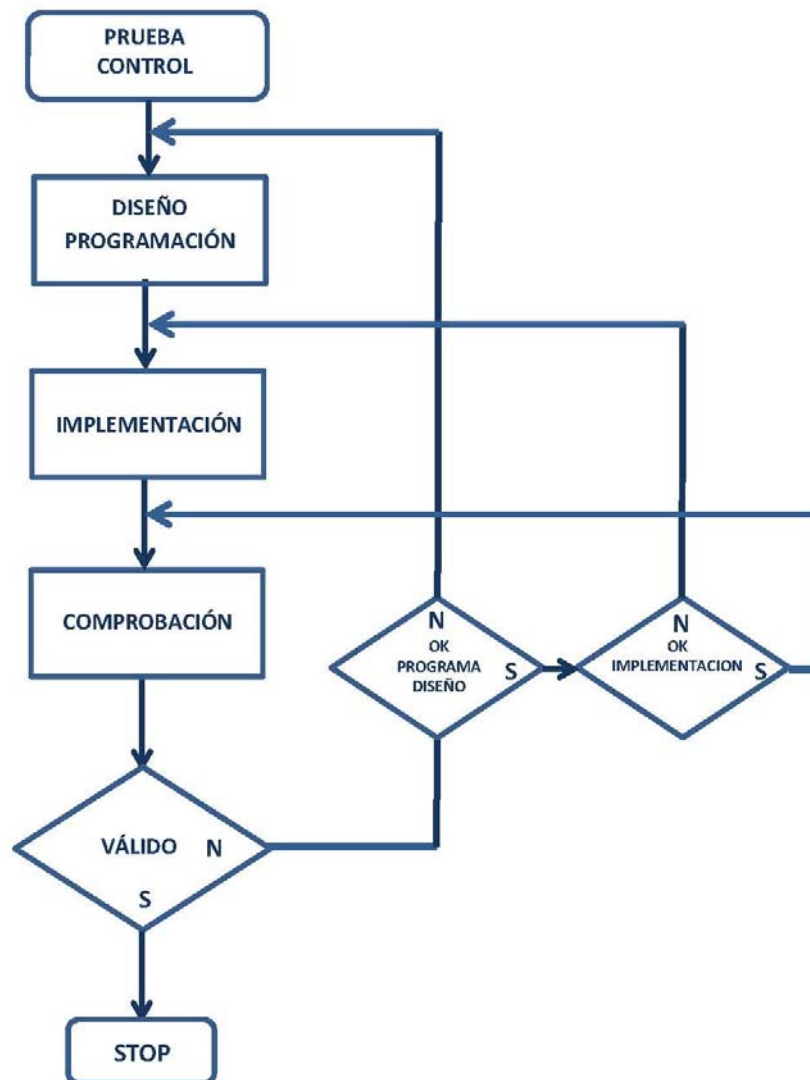


Figura VI.1: Mapa conceptual del proceso seguido en el desarrollo de las pruebas de verificación y contraste

VII.1.1 CONTRASTE DE PRUEBAS

Una vez realizado el método de ensayo para la medición del flujo de calor, se decide iniciar unas pruebas contraste. Leído el procedimiento aparecieron numerosas preguntas que no quedaron aclaradas. Se pretende, por tanto, que las dudas surgidas sobre el procedimiento de funcionamiento de esta monitorización fuesen respondidas a través de la realización de pequeñas pruebas contraste. La finalidad de ello es observar la influencia que ciertas soluciones similares al procedimiento elegido pudiesen interferir en la adecuada y precisa toma de datos de flujo de calor.

¿Se ha medido bien?

Para responder a la primera pregunta, se diseñó la primera y segunda prueba. La **primera prueba** trataba de comprobar que el sensor de flujo de calor estaba midiendo de forma válida la conducción de calor. Para verificarlo se diseñó una caja tipo nevera de poliestireno expandido que tiene una tapa en su parte superior. En las juntas horizontales, la caja se selló con cinta de carrocero. En el centro de la tapa se abrió un orificio donde sobresalió un cilindro de acero de 51mm de diámetro y 150mm de altura. Este cilindro estaba protegido por una coquilla de polietileno (para evitar la pérdida de la conducción de calor). Estaba apoyado en su parte inferior a una caja de madera rellena de arena. Este relleno de arena garantiza la homogénea distribución del calor. Bajo la caja de madera, una resistencia produce una energía calorífica W . Se conoce cuál es la cantidad de suministro de calor a la probeta de acero. En su parte superior se colocó un sensor de flujo de calor que recogía la cantidad de calor que el cilindro de acero transmite por conducción. Finalmente encima del sensor, se colocaron dos disipadores de calor. Conociendo la q en W emitidos y la q en W radiados se podría verificar si el sensor está midiendo adecuadamente.

En la práctica, la recogida de datos fue complicada por la necesidad de considerar las temperaturas fluctuantes, las temperaturas superficiales, las temperaturas radiantes y el efecto del almacenamiento de calor.

Los sensores de flujo de calor generan un voltaje que es proporcional a la densidad de tasa de flujo de calor. El fabricante suministra un factor de calibración indicando la relación entre el voltaje que genera y el flujo de calor que pasa. Normalmente, cada sensor genera entre 40 y 70mV para un flujo de calor de $1W/m^2$

Los sensores utilizados en estos ensayos y en estas pruebas fueron los HFS-4 de la marca Omega que se compraron durante el año 2010. Fue imposible proceder al inicio de la toma de datos hasta el año 2016. Todo aparato de instrumentación viene calibrado de fábrica con una documentación acreditativa. Sin embargo, debido al paso del tiempo y que se ha utilizado una vez, se ve necesario realizar una prueba que verificase que los datos del sensor de flujo de calor obtenidos fuesen los adecuados.

De todos los sensores comprados, se decide utilizar en esta prueba un HFS-4 cogido al azar. La prueba tuvo una duración de 24 horas procediéndose tres situaciones. La primera de incremento de calor por la resistencia hasta los $60^{\circ}C$, un segundo periodo de mantenimiento de la temperatura y un tercer periodo de decremento del calor hasta su total ausencia.

Durante la prueba se comprobó que el calor medido coincidía con el calculado y que la comparación era aceptable.

Además los datos recogidos de flujo de calor también fueron representados en función de la temperatura. En la representación de estos datos se observó una respuesta en el acero que no se había considerado. Una representación que recordaba a las curvas de absorción y desorción hídricas, así como su histéresis.

Además de esta primera prueba, y para saber si había medido bien, se diseñó también una **segunda prueba**. Esta vez, se realizó en un cerramiento real de una vivienda unifamiliar en

Coruxo (Vigo) formado por perliescayola al interior, bloque de termoarcilla de 15cm, aislamiento de poliestireno extruido de 4 cm y ladrillo cara vista al exterior de 11,5cm.

El objetivo planteado para la segunda prueba era la forma más adecuada de fijar el sensor de flujo de calor a la pared. El fabricante suministrador del sensor recomienda la utilización de varias soluciones como *los adhesivos o epoxis convencionales. También se puede utilizar la cinta por doble cara adhesiva tipo Mylar, el epoxi OB-200 de Omega y una cinta fina de poliéster*. Advertidas las diferentes opciones y explicadas en el capítulo tercero de método, no queda claro cuál es la influencia por el tapado del sensor, en este caso, con una cinta de tela, adhesiva con armado de fibras gris. Se trata de verificar si la cinta pudo estar interfiriendo en la medición del flujo de calor.

Para el desarrollo de la monitorización de esta segunda prueba, se coloca un sensor de temperatura ambiental PT-100 en el ambiente interior de la habitación, otro sensor PT-100 en el ambiente inmediato exterior. Además se dispusieron dos sensores de flujo de calor HFS-4, uno en la cara interior del cerramiento. El segundo sensor HFS-4 se situó en el vidrio doble de la ventana. Estos sensores se conectaron al registrador de datos Datataker DT-80. Este Datataker fue conectado a un ordenador que, mediante un programa informático, permitía su programación, conversión de las señales y recogida de los datos obtenidos.

Esta prueba tuvo una duración de 24 horas. Se recogieron datos de flujo de calor, temperaturas superficiales interiores, temperatura ambiental interior y temperatura ambiental exterior.

Se realizaron dos suposiciones, la primera con los sensores adheridos a la superficie del cerramiento y del vidrio mediante cinta fina adhesiva de poliéster. En la segunda suposición, se taparon estos sensores con cinta de tela gris.

Los resultados obtenidos de esta pequeña prueba advirtieron de la obtención de resultados más elevados en la situación de los sensores tapados. Caso a) mostrado en la figura IV.2.

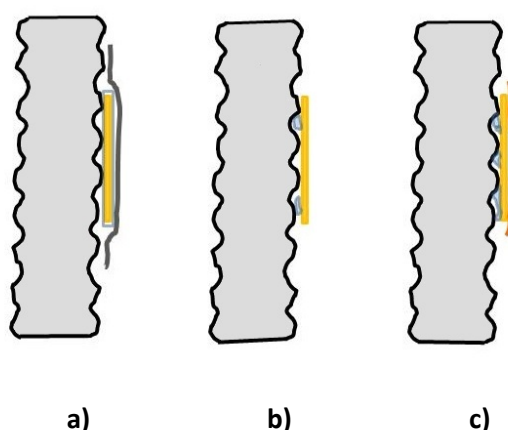


Figura VI.2: Diferentes formas de contacto ensayadas durante las pruebas de monitorización y contraste con el sensor de densidad de tasa de flujo de calor hfs-4. Caso a: funda de plástico y cinta armada color gris. Caso b: contacto irregular con cinta a doble cara o silicona. Caso c: maximización de la superficie de contacto con silicona

El tipo de error puede ser clasificado como error de acoplamiento capacitivo. Este error puede estar sucediendo en el caso que el sensor de flujo de calor (HFS-4) se disponga tapado con una

cinta. En el caso de estar tapado con una cinta, se forma un vacío entre el sensor y la cinta. Este vacío puede estar funcionando como un capacitor aumentando el voltaje de la señal y, por lo tanto, enviando valores de flujo de calor más elevados.

De esta prueba se deduce que la forma de conexión es esencial. El sistema de sujeción y pegado influirá de manera decisiva en la obtención de resultados fiables. Esta conclusión además fue corroborada nuevamente. En concreto, los resultados de uno de los sensores de la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito, concretamente el 3, tuvieron que ser rechazados debido a su insuficiente contacto con la superficie. (Caso b) de la figura IV.2). Esto fue deducido en la comprobación de la medida realizada el 6 de febrero del 2017. Ver capítulo IV.

Durante el proceso de realización esta segunda prueba también se detectó que era necesario apantallar los cables que recogen las señales. El apantallamiento fue realizado por un cable torzonado, que lo protege.

La **prueba** de verificación y contraste **decimocuarta** fue diseñada para conocer la influencia que la convección tenía sobre el sensor para la medición de los valores de la densidad de flujo de calor. Para ello se taparon los sensores de flujo interiores con algodón en su parte superficial en contacto con el ambiente interior.

Las lecturas instantáneas provocaron que de una densidad de flujo de $3,8 \text{ W/m}^2$ se pasase a $1,1$ en el vidrio simple, las temperaturas superficiales en el vidrio en cada una de las caras exterior e interior acaban convergiendo en un solo valor. En el caso del cerramiento opaco de granito, esta reducción supuso un valor de $0,6$ a $0,3 \text{ W/m}^2$.

Por el exterior se realizó otra prueba. Se tapó el sensor de densidad de flujo de calor del exterior con un tubo de papel higiénico reduciéndose la densidad de flujo de calor de -10 a -5 W/m^2 . También se realizó la prueba colocando un alerón. Se observó que la q se reducía menos que en el caso anterior. Asimismo y debido a ese movimiento de convección se detectó ruido en la medición y toma de datos. Con respecto al patrón típico del comportamiento de este cerramiento se observó sin embargo que la variación de la parte de convección no lo hacía variar.

Se concluye que existe una clara evidencia en los sensores al verse influenciados por el movimiento de convección inmediato a la superficie.

¿Podría ser U medido con otras fachadas incrementando la recogida de datos, y/o con diferentes métodos?

Para responder a la siguiente pregunta, se diseñaron las pruebas tercera, cuarta, quinta, sexta y décimo tercera. Para la **tercera prueba** o ensayo, se eligieron los mismos sensores del anterior ensayo pero se diseñó un nuevo programa específico para el registrador de datos. Los sensores elegidos, como el anterior caso, fueron la temperatura ambiental y humedad relativa interior y exterior, la temperatura superficial interior y exterior y finalmente la densidad de flujo de calor en dos posiciones cercanas.

El procedimiento de toma de datos fue variado para conseguir mayor fiabilidad. Varios investigadores exponen la forma en la que la recogida de datos es realizada. Debido a la duración de cuatro días del ensayo, se procede a la recogida del ratio del flujo de calor para hallar la resistencia y transmitancia térmica del cerramiento. El cálculo indicó un valor de transmitancia térmica fue de $0,466 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Este cerramiento es el mismo cerramiento de la vivienda unifamiliar que se utilizó en el anterior ensayo. Pero esta vez, se eligió la orientación este. La elección de esa orientación vino motivada porque existía un pequeño local de apenas 3m^2 , fácil de controlar higrotérmicamente y de evitar cualquier interferencia de radiación y/o convección. El local pudo estar cerrado todo el tiempo y sin ocupación en su interior.

El objetivo de esta prueba tercera fue incrementar la recogida de datos para mejorar la calidad de los registros. Además se provocó artificialmente un salto térmico al mantener la temperatura interior constante y obtener el valor U. Inicialmente se comenzó a realizar la toma de medidas y se advirtió un salto térmico entre el interior y el exterior de alrededor de 6°C . Tras esa situación se decidió incorporar una fuente de calor de forma continua que elevase la temperatura del pequeño local y que produjese un salto térmico mayor, de al menos 10°C .

Debido a que se planteó la duración de la prueba en cuatro días, se trató de aumentar la recogida de medidas. Se recogieron las medidas cada 15 segundos. Cada 240 datos recogidos fueron promediados para dar una medida cada 15 minutos. Tras ese calentamiento se produce el mantenimiento de la temperatura con oscilaciones. A continuación se produce la estabilización de la temperatura interior. Finalmente se apaga la calefacción. La duración de la monitorización fue de cinco días, del 20 al 25 de mayo del 2016.

Los valores de la densidad de flujo de calor W/m^2 se iniciaron sin grandes oscilaciones. Tras un tiempo se produjo la incorporación de calefacción en el recinto. Esto está reflejado en las oscilaciones grandes que se producen en las temperaturas. Tras esas grandes oscilaciones, se produjeron unas más pequeñas. Esto ha sido debido al cambio a una regulación electrónica del radiador. Esta parte de los datos hizo mantener una temperatura interior constante de la que fue fácil extraer el valor del dato de R. Finalmente se deja de producir las oscilaciones ya que se apaga la calefacción. Este evento se inicia con una reducción de la densidad de tasa de flujo de calor llevándolo a valores cercanos a cero, se invierte la densidad de tasa de flujo de calor, es decir, se llega incluso a recibir calor al interior del local. Finalmente y tras 16,6 horas se produce nuevamente un flujo positivo, en dirección de salida al exterior.

Esta monitorización in-situ obtuvo una medida de $R=2,065 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ frente al cálculo realizado de $R=2,15 \text{ m}^2 \text{ K/W}$. Los datos reflejan sólo un incremento de un 4,32% sobre el valor recogido in-situ.

Fueron diseñadas la cuarta, quinta y sexta prueba de verificación para responder a la pregunta si podrían existir otros métodos para la obtención in situ del valor de U, en concreto en la fachada ventilada de granito. Durante el fin de semana del 17 al 18 de septiembre del 2016 se procedió a la recogida de datos de flujo de calor, con el fin de obtener el valor de transmitancia térmica, valor-U en el cerramiento de fachada ventilada.

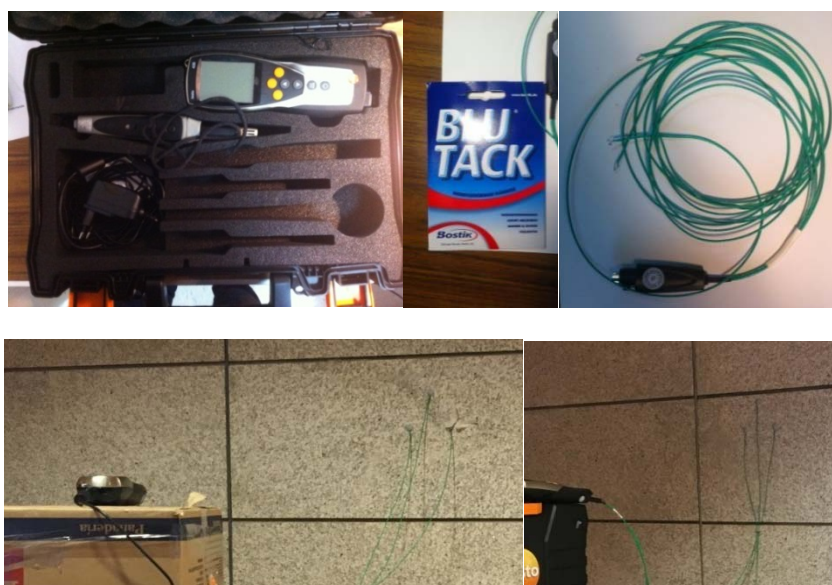


Figura VI.3: Instrumentación del sistema-kit y posiciones de los sensores de temperatura superficial con el sistema-kit testo 435-2

Para su obtención se han utilizado dos tipos de métodos TBM, el método basado en diferencia de temperaturas superficiales y el método HFM basado en la recogida de densidad de flujo de calor. Estos dos procedimientos han sido explicados en el capítulo de método. Para la recogida de valores se han utilizado tres procedimientos, dos de ellos con recogida de datos a través de las temperaturas superficiales o método TBM.

El objetivo de la **prueba de verificación cuarta** era comprobar la obtención del valor U y su distanciamiento entre valores para un mismo cerramiento y con la misma orientación. En esta prueba de contraste cuarta se propuso un nuevo método de obtención del valor U , es decir, por diferencia de temperaturas y se dispuso de una instrumentación alternativa con otra precisión y sensibilidad para realizar la recogida de medidas.

La instrumentación elegida de la recogida de datos con el método TBM o de temperaturas superficiales, ha sido el aparato multifunción de la marca Testo. A él se incorporaron tres sondas de temperatura superficial. Una sonda de temperatura y humedad ambiente exterior y la sonda del aparato multifunción. Se observa en las fotos siguientes la instrumentación utilizada.

El procedimiento se realizó con el kit-sistema de testo 435-2 para la obtención del valor- U . Se procedió a la deducción del dato por un método indirecto, es decir, a través de los tres sensores de temperatura superficial, los sensores de temperatura ambiental interior y exterior e incorporando el valor de la resistencia térmica interior de $R=0,13$ al software, se obtendrá el valor de transmitancia térmica.

Las posiciones ensayadas fueron las indicadas en la figura siguiente. No se observa que la distancia sea muy elevada. El ensayo fue realizado en el mismo aplacado.

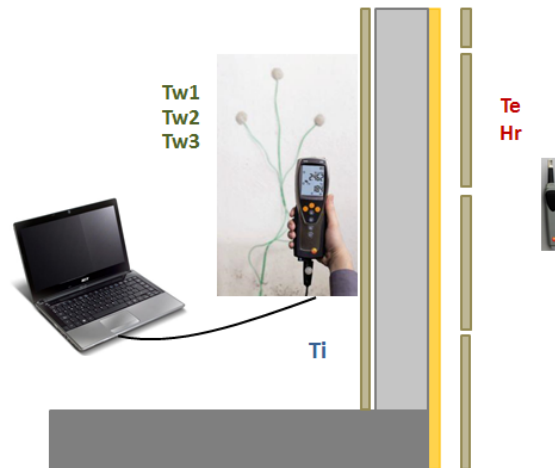


Figura VI.4: Instrumentación para el método de las tres temperaturas TBM con aparato de Testo 435-2 para la obtención del valor U

Para los resultados de este procedimiento basado en la diferencia de temperaturas TBM con el aparato Testo 435-2 y el software, se extrajeron las dos figuras que se exponen a continuación. Por este método se realizaron dos ensayos, uno del 17 de septiembre del 2016 y otro del 18 de septiembre del 2016.

Como se observa, la línea horizontal es la que indica el procedimiento para la obtención de la transmitancia térmica. En el segundo ensayo el valor fue menor, $U=1,05W/m^2K$

En todos los casos la diferencia fue al menos de 10K entre el interior y el exterior. La temperatura interior fue elevada mediante calefacción continua durante todo el proceso que duraron los ensayos.

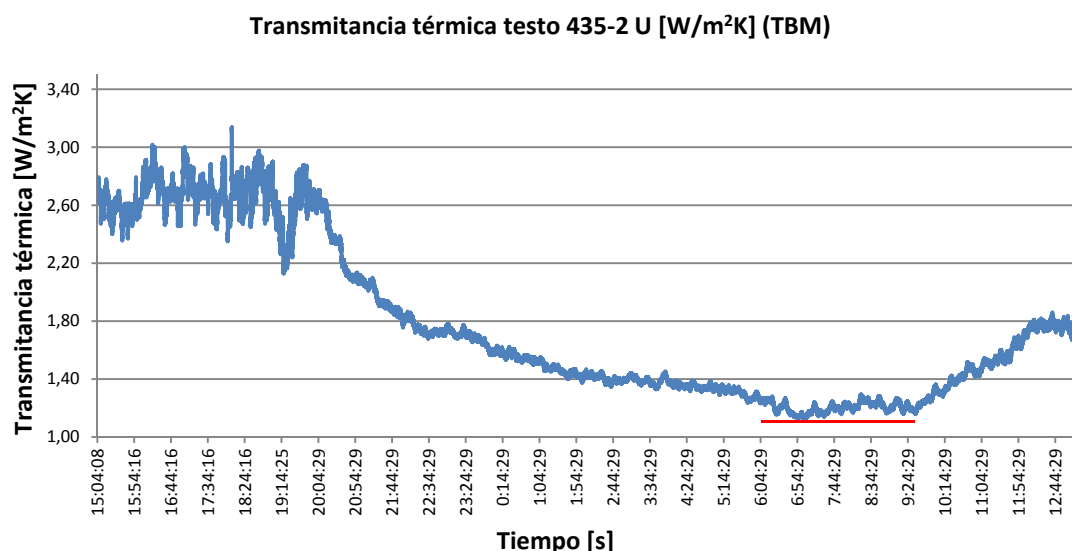


Figura VI.5: Segundo ensayo de transmitancia térmica obtenida por el método de las diferencias de temperaturas TBM con el aparato testo 435-2 el día 18-19 de septiembre del 2016

La **prueba quinta** se diseñó también para la obtención del valor U por el método de TBM o de diferencias de temperaturas, pero esta vez utilizando otras sondas y realizando un software

particular con el datalogger. Esta prueba produjo otra medición del valor de transmitancia térmica, valor-U en la misma posición de recogida de temperatura superficial de los aplacados de granito de la prueba cuarta. Se reforzó la medida de temperatura y humedad relativa interior mediante la incorporación en la recogida de datos del datalogger.

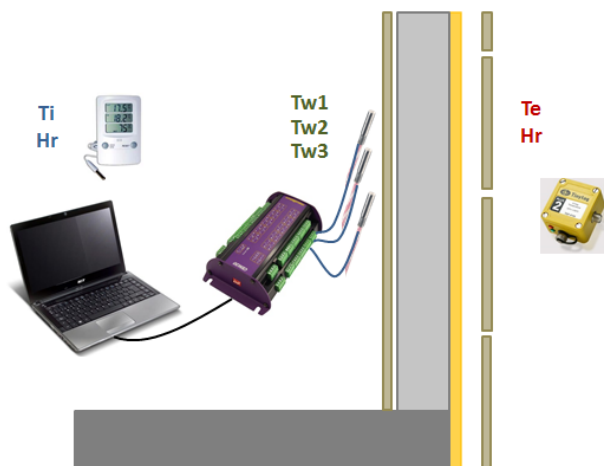


Figura VI.6: Instrumentación para el método de las tres temperaturas TBM con aparato de datalogger DT-85 para la obtención del valor U

Se observa en la siguiente figura el registrador de datos utilizado, vinculado a un software para programar tanto la forma y frecuencia de recogida de datos, así como la para la realización de cálculos indirectos. Se utilizaron también sensores para la recogida de la temperatura superficial tipo PT-100.

Por el segundo procedimiento del método de TBM realizado en la prueba quinta, se obtuvo como valor aproximado en la figura de $U=1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ muy superior al de cálculo. Puede resumirse que todos los resultados obtenidos por el método de diferencia de temperaturas han sido muy elevados. Se corrobora en resumen, lo que la diferente bibliografía analizada muestra que es la necesidad de disponer de unos sensores de gran precisión, así como de saltos térmicos elevados, aproximadamente de 15°K , que en el caso del método de los sensores de flujo de calor

La **prueba sexta** tuvo como objetivo también la obtención del valor U, pero en este caso mediante el método de HFM, o de sensores de densidad de tasa de flujo de calor. En este ensayo por el método de HFM, se utilizó una cinta a doble cara sobre el granito y el sensor de flujo de calor. Este ensayo no tuvo un valor fiable debido a la insuficiente duración de la misma.

Se resume que, si bien se han realizado la recogida de valores de q para la obtención del valor U de transmitancia térmica por dos métodos diferentes, se observa que han sido resultados diferentes y elevados $U=1,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $U=1,4\text{W/m}^2\text{K}$. La diferencia supone un 33%, corroborando la bibliografía en la que indica un salto térmico para el método TBM de 15K.



Figura VI.7: Instrumentación del procedimiento con el datalogger para la recogida de la transmitancia térmica, valor-U

¿Hay un comportamiento higrotérmico característico en los cerramientos en relación a la densidad de tasa de flujo de calor?

Para dar respuesta a esta pregunta fueron diseñadas las pruebas de verificación séptima, octava, novena, décima, onceava y doceava.

Los cerramientos analizados fueron de tres tipos. El primero, un cerramiento compuesto desde el exterior al interior en una hoja de 12cm de espesor de ladrillo cara vista, poliestireno extruido de 4cm y bloque de termoarcilla de 14cm. La cara interior está rematada con un acabado de perliescayola de 1cm. Este cerramiento es ensayado en una orientación noreste. También fue analizado un vidrio doble del tipo climalit planiterm 4-14 parsol 5 templado de la misma orientación que el cerramiento opaco y un vidrio simple.

El objetivo de esta **prueba séptima y octava** trataba de obtener si existía un comportamiento característico del movimiento de la densidad de tasa de flujo de calor en este cerramiento y también del vidrio doble. Para ello se colocaron dos sensores junto al cerramiento, y uno en el vidrio para recoger las variables de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, temperaturas superficiales y densidad de tasa de flujo de calor en el interior de la habitación. En el exterior se recogieron las variables de temperatura y humedad relativa.

El programa de datos introducido recogió la información de las variables cada 30 segundos, realizando un almacenamiento de medida cada 15 minutos. Esta medida de 15 minutos es obtenida de la media representativa de las recogidas cada 30 segundos. La monitorización empezó el 2 y remató el 11 de octubre del 2016, iniciándose la prueba de verificación número 9. A partir del 11 de octubre del 2016 se incorporó a la monitorización un sensor para la recogida de la variable de densidad de tasa de flujo de calor en el exterior, un HFS-4 más

En el caso de la densidad de tasa de flujo de calor por el interior del cerramiento, se observa como los valores máximos obtenidos se corresponden con los valores máximos de temperatura interior. En el caso de la densidad de tasa de flujo de calor del vidrio, son los picos de las diferencias de temperaturas los que se corresponden con los picos de la máxima densidad de tasa de flujo de calor en el vidrio.

Los resultados mostraron una asociación existente entre los valores obtenidos de temperatura ambiente exterior con la temperatura superficial interior del vidrio. Se comprobó que el coeficiente de determinación R^2 o coeficiente al cuadrado de Pearson reflejado en la figura

indica el porcentaje de la variable que explica la otra, se observa que este valor es alto y se explica en un $R^2=0,9415$.

Se concluye que el comportamiento de la densidad de tasa del flujo de calor de un cerramiento es característico y es diferente con respecto al vidrio doble. En este caso, su comportamiento es opuesto, cuando se procede a los valores máximos de flujo de calor en el vidrio, se procede a registrar los valores mínimos del flujo de calor en el cerramiento. También se ha deducido el retardo de dos horas del cerramiento analizado.

Para la obtención, cuantificación y entender las reglas que rigen el comportamiento del flujo de calor latente fue diseñada la **prueba novena**. Esta monitorización introdujo con respecto al ensayo anterior un sensor de tasa de flujo de calor al exterior del cerramiento opaco. La obtención del flujo de calor latente, según (Rogass, 2000) se realizaría por la resta de los flujos de calor entre el interior y el exterior.

El procedimiento seguido continúa siendo el mismo que en la anterior prueba. Desde el día 11 de octubre del 2016 se procedió a la recogida de estos datos en las mismas condiciones que en los ensayos anteriores, habiendo añadido eso sí el sensor de la tasa de flujo de calor por el exterior del cerramiento opaco de ladrillo cara vista.

Los resultados obtenidos mantuvieron el comportamiento de la anterior prueba. En cuanto a las medidas del sensor q_i del cerramiento van en contrafase de la temperatura exterior. Por el contrario, tanto el q_i del vidrio doble como el q_e del cerramiento su comportamiento va en fase con la temperatura exterior. Ello quiere indicar que cuando se produce los picos de temperaturas más altas, estos también se corresponden con los valores de q en la parte interior del vidrio doble y en el q exterior del cerramiento.

Si se procede al análisis de un período natural de 24 h correspondiente a "noche-día", en concreto el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor, se observa en las secciones que durante el día se produce una salida de flujo q_i a la vez que una entrada del flujo q_e . En el caso nocturno, las dos densidades de flujo son del mismo sentido, el q_i es de salida hacia el exterior tal como el caso del q_e .

Con estas variables obtenidas del ensayo se realizaron correlaciones de Pearson. Los resultados mostraron que todas las variables correlacionadas son estadísticamente significativas.

Además es de reseñar la alta asociación positiva entre las variables H_{Re} y q_i . Se muestra ese valor q_i saliente y la H_{Re} exterior tiene una $r=0,809$ (NC=99%). Esta es superior a la asociación de la ΔT . En el caso de la q_e las mayores asociaciones son con q_i y con ΔT con una $r=0,729$ (NC=99%) y $r=0,720$ (NC=99%) respectivamente.

Los valores positivos y negativos por separado fueron sumados. Se obtuvo que el flujo saliente es un 58% mayor que el entrante en el conjunto de las 161h analizadas.

Como resumen de la prueba de verificación novena se puede decir que el valor medio del flujo de calor latente tiene una media muy pequeña, una desviación típica muy grande y el histograma es más o menos normal, sin embargo la suma acumulada de puntuaciones alcanza

un valor significativamente alto. Los ciclos de humedecido y secado pudieran ser la clave de este comportamiento del flujo de calor de la superficie exterior.

Como en el caso de las anteriores pruebas, la **prueba** de verificación **décima** trataba de conocer las densidades de tasa de flujo de calor no sólo en el cerramiento opaco sino también en el caso del vidrio doble tanto en el exterior como en el interior.

En esta prueba la monitorización se realizó nuevamente sobre el cerramiento opaco sin cámara de aire. Las variables que se recogieron fueron temperaturas y humedades relativas tanto interior como exterior y flujos de calor exterior e interior tanto del cerramiento opaco como del vidrio doble.

La duración de la monitorización se produjo entre el 4 y el 13 de noviembre del 2016. En este caso se utilizó el aporte energético interior con calefacción por suelo radiante de la vivienda.

Los comportamientos son los mismos que los encontrados en la prueba de verificación novena anterior. La temperatura ambiente interior ha permanecido constante mientras es la temperatura exterior la que ha estado variando.

En esta prueba de verificación décima el nivel de confianza de los datos obtenidos han sido del 95% y ello es significativo. Por lo tanto estos datos obtuvieron la seguridad adecuada para realizar un tratamiento estadístico.

Analizando los percentiles y los cuartiles de la variable de la humedad relativa exterior, el 50% de los valores de la muestra de la humedad relativa exterior se encuentra entre las puntuaciones de 80% y 95%. En el 25% de los casos más del 95%. Estos valores demuestran las altas humedades relativas exteriores que ha tenido la monitorización. El valor máximo obtenido en la monitorización de la humedad relativa exterior ha sido de 99% y el valor mínimo de 56%. Es importante señalar que el 50% de los valores recogidos están entre 80 y 95% de humedad relativa con una media del 86,6% y una mediana del 90%.

En el caso de la humedad relativa interior el valor de la media es de 74,3%. La mediana 74% y los valores máximo y mínimo están entre 67 y 81%. Es de destacar también aquí la alta humedad relativa interior registrada en la monitorización de la prueba de verificación décima.

Para encontrar una explicación del comportamiento de la densidad de flujo de calor tanto interior como exterior en el cerramiento con materiales porosos e higroscópicos, se utilizó el análisis de regresión lineal.

q_e	q_i
$q_e = -0,467 \Delta T$	$q_i = 0,676 HR_i$
$q_e = -0,488 \Delta T - 0,447 HR_i$	$q_i = 0,728 HR_i + 0,312 T_e$
$q_e = -0,436 \Delta T - 0,370 HR_i - 0,260 HR_e$	$q_i = 0,759 HR_i + 0,317 T_e + 0,106 HR_e$

Tabla VI.1: Ecuaciones de regresión lineal de las variables dependientes q_e y q_i

Donde:

ΔT	[°C]	Diferencia de temperaturas
HR_i	[%]	Humedad relativa interior
HR_e	[%]	Humedad relativa exterior
T_e	[°C]	Temperatura exterior
q_e	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor exterior
q_i	[W/m ²]	Densidad de tasa de flujo de calor interior

Los resultados obtenidos expresados en la tabla anterior muestran que en el caso de querer explicar cómo variable dependiente q_e , el parámetro de la diferencia de temperaturas es la variable que mejor explica el comportamiento de q_e . Esta variable explica en un 46% de su comportamiento. Puede verse la ecuación de regresión lineal. Para mejorar el nivel de explicación de q_e se plantean otras dos ecuaciones de regresión que incorporan más variables. En concreto, la humedad relativa interior y la humedad relativa exterior. La q_e se explica en un 64,6% con las dos variables, diferencia de temperatura y humedad relativa interior y en un 69,0% para las tres variables, diferencia de temperatura, humedad relativa interior y humedad relativa exterior.

En el caso de explicar el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor q_i es la variable de la humedad relativa interior la que explica en un 67% su comportamiento. Para mejorar el nivel de explicación de q_e se plantean otras dos ecuaciones de regresión que incorporar más variables. En el caso de las dos variables introducidas en la ecuación de regresión, esta ecuación explica el 74,2% del comportamiento de q_i . En el caso de las tres variables, se explica en un 74,9%.

Se puede resumir que en cuanto al comportamiento de la densidad de la densidad de tasa de flujo de calor exterior e interior en el cerramiento de termoarcilla y ladrillo cara vista que la q_e obtenida puede explicarse en un 46,7% con la variable de diferencia de temperatura. En cuanto a la q_i esta variable puede explicarse en un 67,6% con la variable de humedad relativa interior.

El objetivo para la **onceava y doceava prueba** de verificación fue el conocimiento de la densidad de tasa de flujo de calor en el vidrio doble, material no poroso. También se ha tratado de averiguar si existe un patrón en el comportamiento.

La instrumentación utilizada han sido tres sensores de densidad de tasa de flujo de calor, dos dispuestos en la cara exterior e interior del vidrio doble y uno en el interior del cerramiento de termoarcilla, poliestireno extrusionado y ladrillo cara vista.

Realizada la prueba estadística de regresión y poniendo como variable dependiente la densidad de flujo de calor interior o q_i mostraron que esta variable es explicada en un 0,962 por la diferencia de temperaturas exterior e interior ΔT . En el caso de la q_e o densidad de flujo de calor exterior q_e , la variable de la diferencia de temperaturas ΔT explica en un 0,915 el comportamiento.

Se puede concluir que la densidad del flujo de calor exterior e interior en el material no poroso de vidrio doble es explicada en más de un 90% por la diferencia de temperaturas.

El objetivo de la **décimo tercera prueba** de verificación era conocer como es el patrón de comportamiento de otro tipo de cerramiento opaco. En esta ocasión el nuevo cerramiento a analizar se componía de pasta de granito por la cara exterior de 17cm de espesor, aislamiento de 4cm de poliestireno extrusionado y finalmente otros 17cm de espesor de pasta de granito localizado en Coruxo-Vigo (Pontevedra).

Se realizó la recogida de datos, no sólo del cerramiento de granito sino también y de forma simultánea la densidad de flujo de calor del vidrio doble. La monitorización fue desarrollada desde el día 1 y hasta el día 10 de diciembre del 2016.

Con los datos obtenidos, se procedió a analizar si existía también un patrón de comportamiento en otro cerramiento de granito, y esta vez analizando por separado las noches de los días. En este estudio se buscó relación entre los valores exteriores y los interiores. Se encontró que el flujo exterior se correlaciona con el interior de día. La explicación puede ser debido a la variación de temperaturas exteriores altas y la radiación difusa. Sin embargo, por la noche, no se ha encontrado correlación entre el flujo obtenido de la cara interior del obtenido de la cara exterior.

¿Influye el agua y/o humedad en la densidad de tasa de flujo de calor?

Finalmente la **prueba decimosexta** de verificación tuvo como objetivo comprobar como recogía medidas el sensor de densidad de tasa de flujo de calor cuando se incorporaba agua mediante su aspersión al ambiente interior y a la superficie de granito interior. También se trataba de observar cual era la medida por el hecho de cambiar el sentido indicado por el fabricante. Finalmente se observa como fue el proceso en su totalidad y si la tendencia del comportamiento del muro de granito era la misma que en el caso de la prueba de verificación décimo tercera.

Para ello se diseñó una prueba en la que se recogieron datos de densidad de tasa de flujo de calor interior y temperaturas. Se dispusieron dos sensores, uno de forma inversa a la indicada por el fabricante Omega y el tercer sensor midió la densidad de tasa de flujo de calor exterior. También se monitorizaron la temperatura interior y la temperatura exterior.

La prueba se inició y al cabo de un rato se provocó la aspersión de agua al ambiente inmediato del sensor de flujo interior y a la superficie del granito. Se detectó que al dispersar gotas de agua al ambiente, quedaron posadas sobre la superficie del granito. Además este sensor se colocó sobre un yeso húmedo que tardó un tiempo en secar. Tras un aumento inicial del valor de la densidad de tasa de flujo de calor negativo (sentido de salida de densidad de tasa de flujo de calor), éste fue disminuyendo hasta dar valores positivos (sentido de entrada de densidad de tasa de flujo de calor)

Se resume que ha existido un incremento del valor de magnitud en la densidad de tasa de flujo de calor interior al mojar la superficie.

Para rematar, y mediante una tabla, se ha resumido todas las pruebas de verificación y contraste realizadas. Esta tabla refleja los objetivos que tuvieron cada prueba planteada, los aparatos que se utilizaron, la duración y un pequeño resumen de los hallazgos más relevantes.

Resumen de verificaciones realizadas para la medición de la densidad de flujo de calor

Prueba	Objetivo	Elemento de ensayo	Medición		Duración	Hallazgos
			Valor	Aparato		
nº1	Validación de medida del sensor de flujo de calor Calibración del sensor	Probeta de cilindro de acero cerrada en una caja de poliestireno expandido	Qi Tsi Qe Tse Ti Te	HFS-4 HFS-4 PT-100 PT-100	24h	.Validación de medida. Encontrado proceso de histéresis térmica en la probeta de cilindro.
nº2	Modo de fijación a la pared -Tapado -No tapado Posición del sensor	Cerramiento (Vigo) Parte opaca: LCV+XPS+TERM Parte vidrio: Vidrio doble Orientación: oeste	Qi c Tsi c Qi v Tsi v Tsi Te	HFS-4 HFS-4 PT-100 PT-100	24h	.No tapar el sensor. Con sensores tapados se obtuvo mayor valor de la densidad de flujo de calor. .Es necesario apantallar los cables. .Influencia convectiva de los sensores por movimiento cercano. .Cara positiva y negativa
nº3	Incremento de recogida de datos por tiempo: medidas cada 15 segundos promediadas cada 15 minutos Obtención valor U	Cerramiento (Vigo) Parte opaca: LCV+XPS+TERM Vidrio doble Orientación: noreste Aporte energético de calefacción	Qi c1 Tsi c1 Qi c2 Tsi c2 Ti Te H	HFS-4 HFS-4 PT-100 PT-100	96h Fechas: 20 a 25 mayo 2016	.Valor U obtenido muy similar al obtenido por cálculo. Diferencia de un 4,3%
nº4	Verificación de medida in situ feb-mar 2016 Obtención valor U por el método indirecto de temperaturas TBM	Fachada ventilada de granito (Coruña) Parte opaca: GR+CV+PU+HOR+ MOR+GR Orientación: norte Aporte energético de calefacción	Tsi c1 Tsi c2 Tsi c3 Ti Te Ti Te Hr	Testo 435-2 PT-100 Tinytag PT-100 T bulbo húmedo	48h Fechas: 17 a 19 septiembre 2016	.Valores U obtenidos distaron del cálculo
nº5	Verificación de medida in situ feb-mar 2016 Obtención valor U por el método indirecto de temperaturas	Fachada ventilada de granito (Coruña) Parte opaca: GR+CV+PU+HOR+ MOR+GR Orientación: norte	Tsi c1 Tsi c2 Tsi c3 Ti Te Hr	PT-100 PT-100 PT-100 PT-100 PT-100 Tinytag PT-100	24h Fechas: 17 a 18 septiembre 2016	.Valores U obtenidos distaron del cálculo

	TBM	Aporte energético de calefacción		T bulbo húmedo		
nº6	Verificación de medida in situ feb-mar 2016 Obtención valor U por el método de sensores de flujo de calor HFM	Fachada ventilada de granito (Coruña) Parte opaca: GR+CV+PU+HOR+ MOR+GR Orientación: norte Aporte energético de calefacción	Qi c1 Tsi c1 Qi c2 Tsi c2 Ti Te H	HFS-4 HFS-4 PT-100 PT-100 Tinytag PT-100 T bulbo húmedo	24h Fechas: 17 a 18 septiembre 2016	.Valores U obtenidos distaron del cálculo
nº7	Estudio de la densidad del flujo de calor en la superficie interior de un cerramiento opaco sin cámara	Cerramiento (Vigo) Parte opaca: LCV+XPS+TERM Orientación: noreste Sin aporte energético de calefacción	Qi c Ti c Ti Te Hr	HFS-4 Tinytag PT-100 PT-100 Bulbo húmedo	Fechas: 1 al 2 de octubre 2016	.Correlación de comportamiento de la densidad de flujo de calor con la temperatura interior y exterior
nº8	Estudiar el comportamiento de la densidad de flujo de calor interior en paredes higroscópicas y no higroscópicas .cerramiento opaco sin cámara .vidrio	Cerramiento (Vigo) Parte opaca: LCV+XPS+TERM Parte vidrio: Vidrio doble Orientación: noreste Sin aporte energético de calefacción	Qi c Tsi c Qi v Tsi v Ti Te Hr b Tomas: 1min 1s promedio (1h)	HFS-4 HFS-4 Tinytag PT-100 PT-100 Bulbo húmedo	Fechas: 2 al 11 octubre 2016	.Patrones diarios de comportamiento característico según el tipo de cerramiento: -Opaco sin cámara -Vidrio doble
nº9	Estudio de la diferencia de densidad del flujo de calor entre la superficie interior y exterior del cerramiento opaco sin cámara	Cerramiento (Vigo) Parte opaca: LCV+XPS+TERM Parte vidrio: Vidrio doble Orientación: este P 1º Sin aporte energético de calefacción	Qi c Tsi c Qe c Tse c Qi v Tsi v Ti Te Hr	HFS-4 HFS-4 HFS-4 Tinytag PT-100 PT-100 Bulbo húmedo	Fechas: 11 de octubre al 4 de noviembre del 2016	.Evaluación del comportamiento de la densidad de flujo de calor interior y exterior con respecto a las temperaturas exteriores e interiores
nº10	Estudio de la diferencia de densidad del flujo de calor entre la superficie interior y exterior del cerramiento opaco sin cámara	Cerramiento (Vigo) Parte opaca: LCV+XPS+TERM Parte vidrio: Vidrio doble Orientación: este Con aporte	Qi c Tsi c Qe c Tse c Qi v Tsi v Qe v Tse v Ti Te	HFS-4 HFS-4 HFS-4 HFS-4 Tinytag PT-100	Fechas: 4 al 13 de noviembre del 2016	.Evaluación de la diferencia de densidad de flujo de calor, ponderando un 40% sobre la totalidad de la densidad de flujo de calor interior

		energético de calefacción	Hr	PT-100 Bulbo húmedo		
nº11	Estudio de la densidad del flujo de calor del interior y el exterior de un material no poroso (vidrio doble)	Cerramiento (Vigo) Parte opaca: LCV+XPS+TERM Parte vidrio: Vidrio doble Orientación: este Con aporte energético de calefacción interior	Qe c Tse c Qi v Tsi Qe v Tse Ti Te Hr	HFS-4 HFS-4 HFS-4 Tinytag PT-100 PT-100 Bulbo húmedo	Fechas: 15 a 20 de noviembre del 2016	.El comportamiento de la densidad de flujo de calor exterior e interior se explica en más de un 90% por la diferencia de temperaturas entre el exterior e interior
nº12	Continuación del estudio de la diferencia de densidad de flujo de calor entre la superficie interior y exterior del vidrio doble	Cerramiento (Vigo) Parte opaca: LCV+XPS+TERM Parte vidrio: Vidrio doble Orientación: este Con aporte energético de calefacción interior	Qe c Tse Qi v Tsi Qe v Tse Ti Te Hr	HFS-4 HFS-4 HFS-4 Tinytag PT-100 PT-100 Bulbo húmedo	Fechas: 21 a 25 noviembre 2016	.Evaluación de la diferencia de densidad de flujo de calor
nº13	Monitorización de la densidad del flujo de calor en la superficie interior y exterior en otro cerramiento opaco	Cerramiento (Vigo) Parte opaca: GR+XPS+GR Parte vidrio: Vidrio doble Orientación: noreste Aporte energético de calefacción interior	Qi c Tsi Qe c Tse Qi v Tsi Te Ti Hr	HFS-4 HFS-4 HFS-4 Tinytag PT-100	Fechas: 1 a 10 diciembre 2016	.Patrón diario de comportamiento característico según del tipo de cerramiento: -Opaco de granito .Obtención de la diferencia de densidad de flujo de calor,
nº14	Observación de la influencia de convección en el sensor Monitorización de la densidad de flujo de calor en vidrio simple	Cerramiento (Vigo) Parte opaca: GR+XPS+GR Parte vidrio: Vidrio simple Aporte energético de calefacción interior	Qi v Tsi Qe v Tse Te Ti Hr	HFS-4 HFS-4 HFS-4 Tinytag PT-100	Fechas: 13 diciembre al 21 diciembre 2016	.Variación de la densidad de flujo de calor $[W/m^2]$, tapando sensor interior con sup de algodón: Vidrio 3,8 a 1,1 Cerram: 0,6 a 0,3 Tapando sensor ext con tubo papel wc Cerram: -10 a -5 .Patrón de comportamiento característico de un vidrio simple
nº16	.Comprobación en lectura continua de medidas FV y cerramiento de	Cerramiento (Vigo) Parte opaca: GR+XPS+GR Aporte energético	Qi c Tsi c Qi c Tsi c Qe v	HFS-4 HFS-4 HFS-4	Fechas: Del 14 de enero al 17 de enero del 2017	.Obtención del cambio de signo y no magnitud en la medida de la densidad de tasa

	granito	continuo de calefacción interior	Tse v			de flujo de calor interior al invertir la posición de funcionamiento del sensor
	.Verificación de la inversión de signo del sensor de densidad de tasa de flujo de calor		Ti Te Hre Hri	Tinytag interior		
	.Comprobación de inversión de flujo al incorporarle agua al cerramiento y ambiente inmediato mediante aspersión de agua			Tinytag exterior		.Incremento del valor de magnitud en la densidad de tasa de flujo de calor interior al mojar la superficie

Tabla VI.2: Resumen de las verificaciones realizadas con ensayos y/o monitorizaciones in situ

VI.1.3 SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS INTRODUCIDOS EN EL ANÁLISIS NUMÉRICO

Se ha desarrollado un estudio de sensibilidad adicional para evaluar el impacto de los datos introducidos en la precisión de los resultados, usando diferentes propiedades de los materiales que componen el cerramiento.

Variación de las propiedades de los materiales: granito, poliuretano y hormigón

Se han identificado tres tipos de propiedades del granito. La primera en la base de datos Masea de Wufi Pro y la segunda en la norma EN 12524

Las principales diferencias se observan en el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua μ , tal y como son listadas en la siguiente tabla

Tipo de granito	Peso específico	Porosidad	Calor específico	Conductividad térmica	Factor de resistencia a la difusión de vapor
	[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]
Granito Masea BD	2453	0,095	702	1,66	54
Granito EN12524	[2500-2700]	0,095	1000	2.8	10000

Tabla VI.3: Propiedades de dos tipos de granito según bases de datos diferentes

Se ha procedido al análisis de sensibilidad del poliuretano de tres tipos de propiedades obtenidas tanto de la base de datos del Wufi IPB BD, como de la norma EN12524 y finalmente de un autor Marechal.

Tipo de poliuretano (PU)	Peso específico	Porosidad	Calor específico	Conductividad térmica	Factor de resistencia a la difusión de vapor
	[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]
PU IBP BD	40	0,95	1500	0,03	50
PU Marechal	31,9	0.96	1400	0,0248	50
PU EN12524	[22-55]	-	1400	0,05	60

Tabla VI.4: Propiedades de tres tipos de poliuretano según bases de datos diferentes

De todas las propiedades recogidas, es la característica de la propiedad de la conductividad térmica la que ofrece mayores diferencias en valor.

Se realiza también el análisis de sensibilidad de tres tipos de hormigón. En este caso el espesor de 25cm le proporciona una gran cantidad de material en relación al espesor total, teniendo la hipótesis previa que la elección de las propiedades de hormigón es de máxima relevancia en el comportamiento final. Se ha recogido tres tipos de hormigón, dos de la base de datos de Wufi, Masea e IBP y uno de la norma EN12524. En la tabla VI.5 se disponen de las propiedades que se incorporan al programa.

Tipo de hormigón	Peso específico	Porosidad	Calor específico	Conductividad térmica	Factor de resistencia a la difusión de vapor
	[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]
Hormigón Masea BD	2104	0.22	776	1.373	76
Hormigón IBP BD w/c=0.5	2300	0.18	850	1.6	180
Hormigón EN12524	[1800-2400]	0.18	1000	2.4	130

Tabla VI.5: Propiedades de tres tipos de hormigón según bases de datos diferentes

Como se observa en la tabla, las propiedades con mayores diferencias de valores son la conductividad térmica y el factor de resistencia al vapor. En el caso de la conductividad térmica, el valor mayor es el de la base de datos EN12524 siendo 1,75 veces más que el valor menor. En el caso del factor de resistencia a la difusión de vapor el valor mayor es 180, de la base de datos de IBP de Wufi Pro y es 2,36 veces más que el que ostenta el hormigón de la base de datos de Masea, también del programa.

Resultados obtenidos de la variación de las propiedades de los materiales: granito, poliuretano y hormigón

Si se representa el caso de las propiedades de los granitos de dos fuentes diferentes se obtiene la figura del contenido de agua en el último año de simulación abajo mostrada. Se debe decir que el comportamiento del cerramiento en relación al contenido total de agua en el último año de la simulación es casi idéntico. No se advierten diferencias de comportamiento destacables.

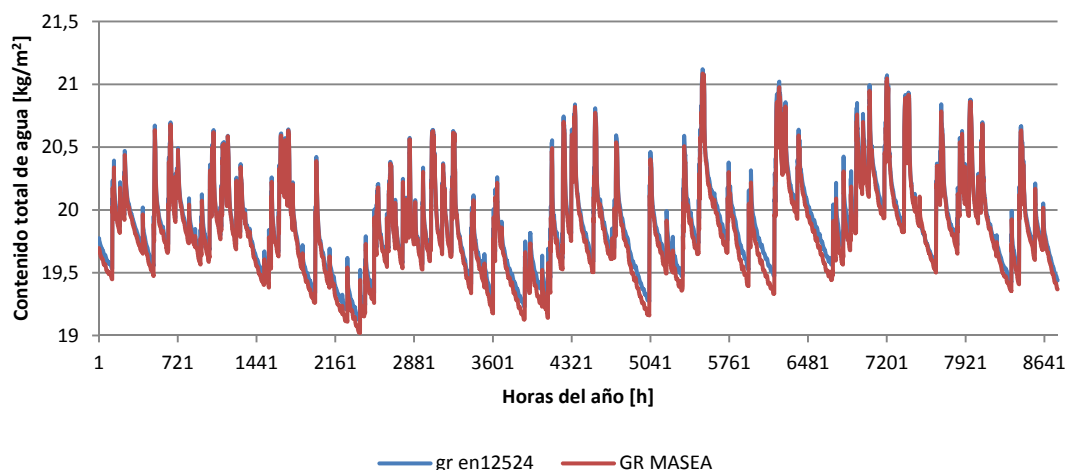


Figura VI.8: Contenido total de agua del cerramiento en el último año de simulación con dos tipos de propiedades diferentes de granito. Resultados Wufi Pro 5.3.

En el caso del poliuretano, se seleccionaron tres tipos de fuentes de bases de datos. Dos de ellas se han utilizado las bases de datos que posee Wufi Pro 5.3. Representando los contenidos totales de agua extraídos del último año de la simulación, se ha detectado que dos de ellas, IBP y Marechal (en línea roja y verde respectivamente) son comportamientos casi idénticos. No sucede lo mismo en el caso del EN12524, éste comportamiento eleva ligeramente el contenido total de agua del cerramiento. Puede observarse en la figura siguiente.

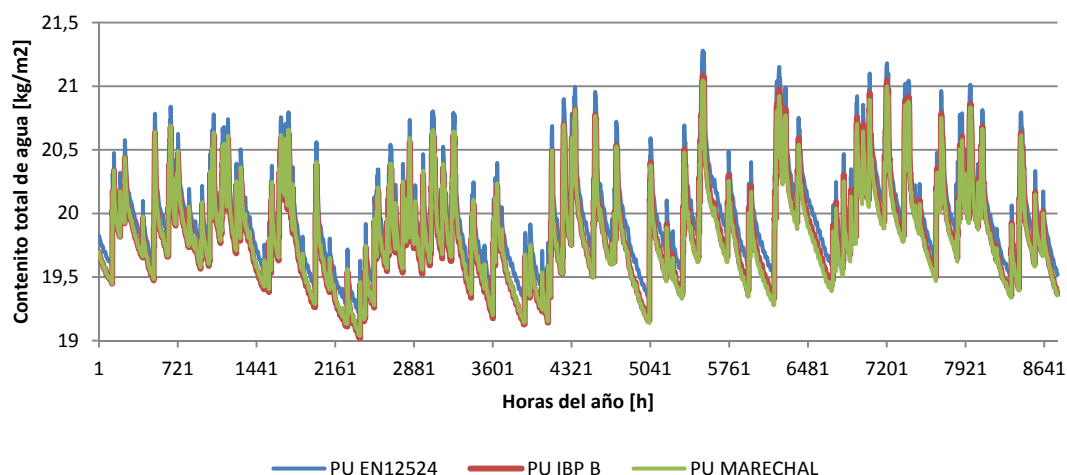


Figura VI.9: Contenido total de agua del cerramiento en el último año de simulación con tres tipos de propiedades diferentes de poliuretano. Resultados Wufi Pro 5.3.

Finalmente fueron analizados también los contenidos totales de agua del cerramiento de fachada ventilada también variando tres tipos de hormigón de diferentes bases de datos. En el caso del hormigón de la base de datos de Masea (en verde) es considerablemente superior el contenido total de agua del cerramiento. Éste además se mantiene estable y superior durante el año simulado. En el caso de las propiedades de las dos bases de datos restantes, el hormigón de la base IBP es ligeramente superior al de la norma EN12524.

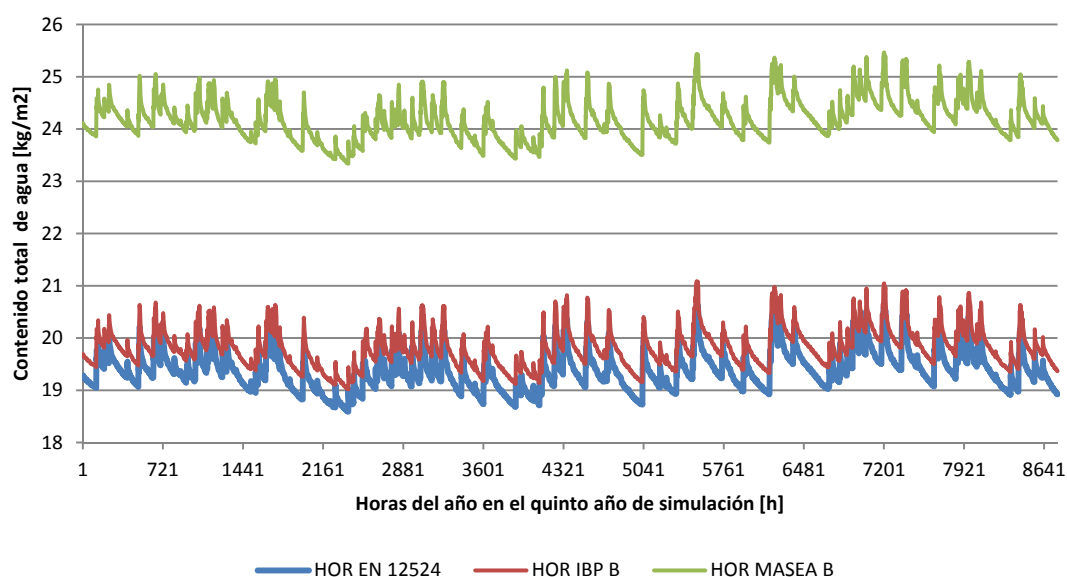


Figura VI.10: Contenido total de agua del cerramiento en el último año de simulación con tres tipos de propiedades diferentes de hormigón. Resultados Wufi Pro 5.3.

Se concluye que las propiedades del granito y poliuretano no han influido significativamente en el contenido total de agua. En el caso del hormigón, si se advierten diferencias significativas por lo que habrá que considerar.

Resumen de las simulaciones efectuadas

Variación del **contenido total de agua (Kg/m^2)** de la fachada entre el inicio de la simulación y el final, **(al cabo de cinco años)**, según los siguientes parámetros variables.

Propiedades materiales	Parámetros	Inicio	Fin	Diferencia
Granito	GR IBP Base de Datos	21,9	19,4	-11,42%
	GR EN 12524	21,9	19,4	-11,42%
Poliuretano	PU IBP Base de Datos	21,9	19,4	-11,42%
	PU EN 12524	21,9	19,5	-10,96%
	PU Marechal	21,9	19,4	-11,42%
Hormigón	HOR IBP Base de Datos	21,9	19,4	-11,42%
	HOR Masea Base de Datos	27,9	23,8	-14,70%
	HOR EN 12524	21,9	18,9	-13,70%

Tabla VI.6: Variación del contenido total de agua en las simulaciones efectuadas. Wufi Pro 5.3. (Verde: simulación con los mismos parámetros)

VI.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado del capítulo se realiza una comparación con los resultados obtenidos de los distintos ensayos y simulaciones realizadas. Se ha organizado en tres partes: ambiente, flujo de calor y transmitancia térmica.

VI.2.1 AMBIENTE

Clima monitorizado *in situ* y de simulación *Meteonorm*.

En esta parte se procede a analizar cuál ha sido la diferencia entre los valores normales (obtenidos del software *Meteonorm*) utilizados para las simulaciones y los resultados obtenidos de la monitorización. Se ha elegido cuatro meses del año, enero, abril, julio y octubre para observar cual son las diferencias entre el comportamiento de temperatura y humedad registrada y el simulado con los datos del software *Meteonorm*.

La figura abajo representada hace referencia al mes de enero del 2009. En líneas discontinuas se observa los valores recogidos para la simulación, datos de temperatura y humedad relativa del ambiente exterior.

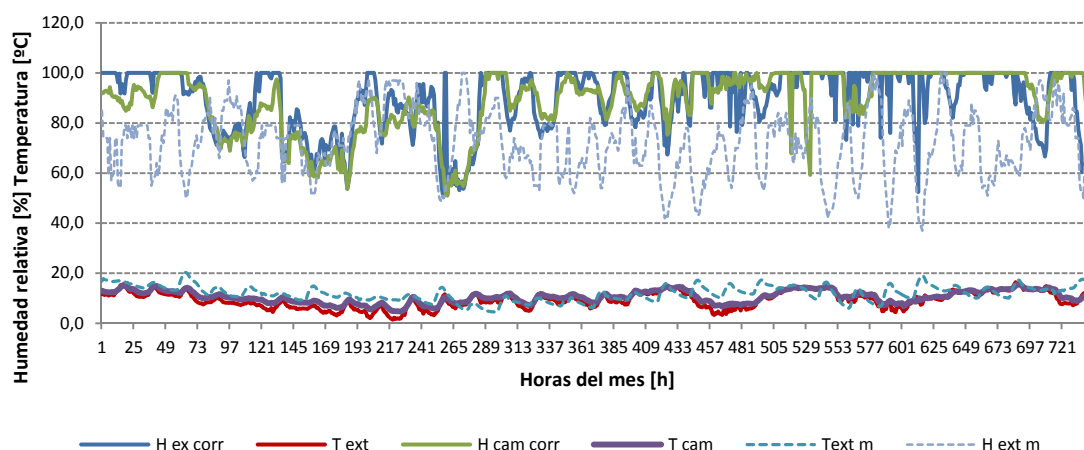


Figura VI.11: Valores horarios de temperatura (°C) y humedad relativa (%) del mes de enero. Valores en discontinuo de temperatura y humedad relativa exterior del software *meteonorm*. Valores continuos de temperatura y humedad relativa del exterior y de la cámara recogidos de la monitorización in situ enero 2009.

En los valores de temperatura para la simulación, se observa normalmente valores de comportamiento oscilatorio. Sin embargo, en el caso de los datos recogidos, esto no es así, ya que los valores oscilatorios térmicos se relacionan con humedades relativas más bajas. Por contraposición esta tendencia es la contraria en el caso de valores altos de humedad relativa, no existen con claridad esas oscilaciones térmicas diarias.

Si se analizan los datos del mes de enero, hay más valores de temperatura superiores en los datos de la simulación que en los datos recogidos. Con respecto a los valores de humedad relativa, en general, son superiores los datos de humedad relativa de la simulación que los datos recogidos *in situ*.

En el caso de mes de abril, las oscilaciones de humedad relativa recogidas in situ tienen menor amplitud que las consideradas en la simulación (en líneas discontinuas).

Con respecto a las temperaturas, se advierte un comportamiento en general sinusoidal, exceptuando cuando hay variaciones de contenido de humedad debido a las precipitaciones. Los valores de la simulación establecen unas tendencias sinusoidales más continuas.

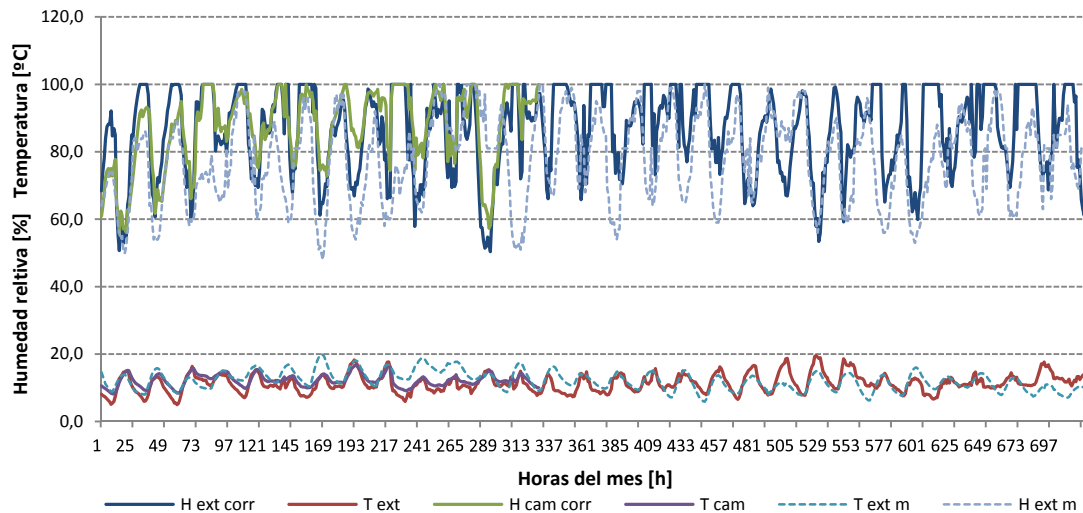


Figura VI.12: Valores horarios de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%) del mes de abril. Valores en discontinuo de temperatura y humedad relativa exterior del software *meteonorm*. Valores continuos de temperatura y humedad relativa del exterior y de la cámara recogidos de la monitorización in situ abril 2009.

Es de advertir, que en el mes de abril el aparato que recogía los datos de la cámara de aire fue extraído. Los valores corregidos del mes de julio del 2008 tanto en temperatura como en humedad relativa en comparación con los simulados, son coincidentes en algún caso, otros son de valores superiores y otros inferiores. Esta situación puede verse claramente reflejada en la figura anterior. Los valores de humedad relativa no alcanzan tan frecuentemente 100% como en el caso de meses con precipitaciones frecuentes.

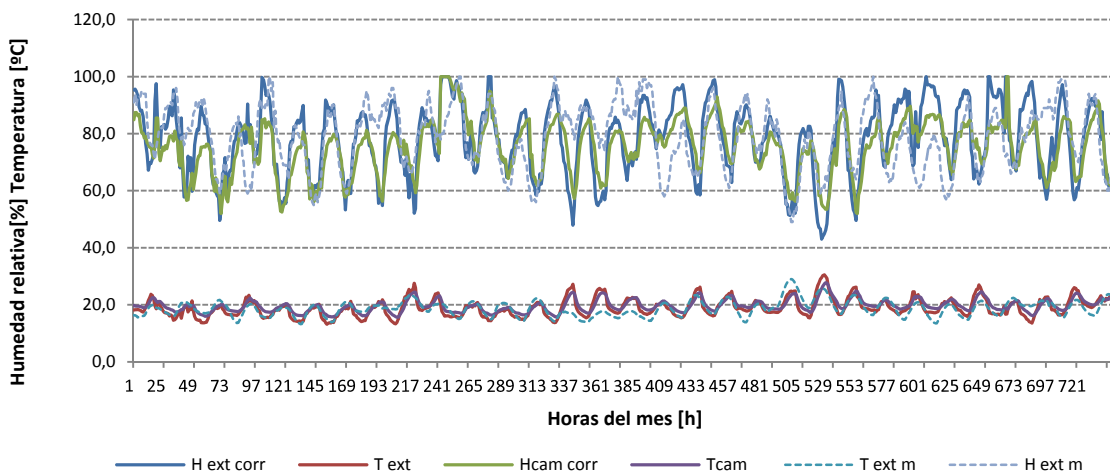


Figura VI.13: Valores horarios de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%) del mes de julio. Valores en discontinuo de temperatura y humedad relativa exterior del software *meteonorm*. Valores continuos de temperatura y humedad relativa del exterior y de la cámara recogidos de la monitorización in situ julio 2008.

La tendencia de la humedad relativa en la cámara, como en los meses precedentes, es inferior que la humedad relativa del ambiente exterior.

Si se analiza el mes de octubre, un mes típicamente otoñal, los valores de humedad relativa que alcanzan el 100% son frecuentes si los comparamos con los valores que se utilizaron en la simulación. En general, los valores de humedad relativa en este mes son superiores a los indicados en la simulación. La humedad relativa en la cámara es de valores menores que las del ambiente exterior.

En el caso de la temperatura, los valores de monitorización y los de simulación, son muy parecidos en diferentes días, no obstante siguen difiriendo, sobre todo, son valores más altos que la monitorización.

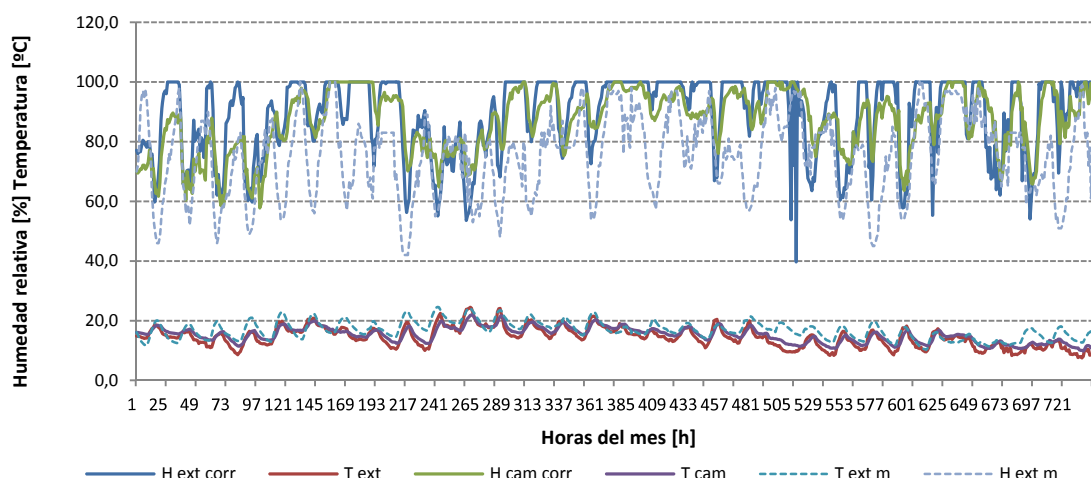


Figura VI.14: Valores horarios de temperatura (°C) y humedad relativa (%) del mes de octubre. Valores en discontinuo de temperatura y humedad relativa exterior del software *meteonorm*. Valores continuos de temperatura y humedad relativa del exterior y de la cámara recogidos de la monitorización in situ octubre 2008.

En resumen, a lo largo de los meses analizados anteriormente se ha mostrado que la humedad relativa ambiental ha sido superior en la monitorización que de los valores de datos recogidos en las estaciones cercanas, así como la del valor normal de la humedad relativa de la estación AEMET de A Coruña-Ronda de Nelle.

Y es justamente el parámetro de la **humedad relativa ambiental**. Este parámetro junto con la temperatura es de gran relevancia puesto que nos indica la cantidad de agua que tiene un ambiente y como consecuencia un posible riesgo hídrico ambiental debido a éste parámetro.

En este sentido es reseñable el conocimiento del clima del lugar donde se sitúa el edificio es de extrema importancia puesto que puede hacer variar el comportamiento higrotérmico. Véanse los capítulos IV y V

En el caso de los valores obtenidos de temperatura y humedad relativa en la **cámara de aire** de la fachada ventilada de granito con la simulación efectuada y poniéndolos en comparación con los datos recogidos en la monitorización in situ del 2008-2009, se ha detectado que los valores recogidos de los meses de invierno y primavera tienden a ser inferiores a los registrados in situ y son más parecidos que en los meses de verano donde los valores simulados son superiores.

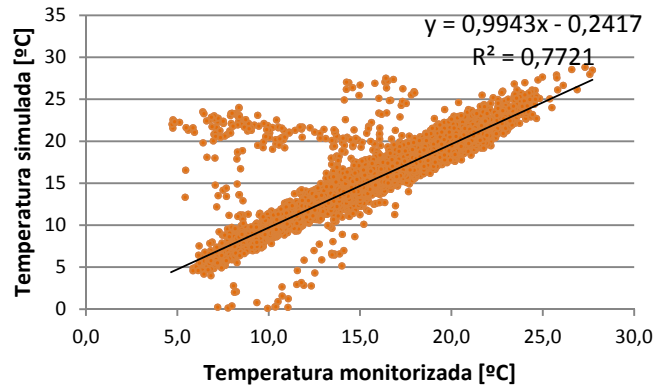


Figura VI.15: Dispersión de valores de temperatura de la cámara monitorizada y temperatura de la cámara simulada durante el año 2008-2009

La gráfica de dispersión siguiente, expresada en la figura VI.15, muestra los valores de temperatura monitorizada en el eje x como parámetro de control y los valores de temperatura simulada de la cámara de aire de la fachada ventilada en el eje y. En ella puede observarse la relación entre estas dos variables, la temperatura de la cámara simulada o predicha y la experimentada.

En la figura VI.15 también se ha representado la línea de tendencia y la ecuación de regresión lineal entre las variables, con un coeficiente de determinación $R^2=0,7721$. Es decir, la temperatura de la cámara simulada ha conseguido correlacionarse en un 87%, (coeficiente de Pearson) la temperatura de la cámara de aire monitorizada.

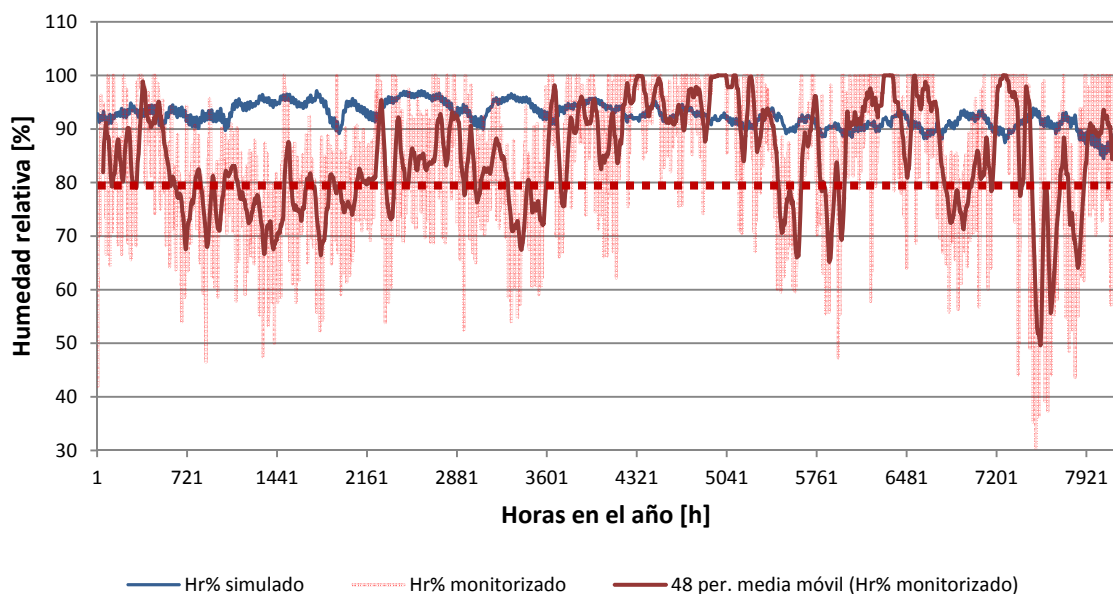


Figura VI.16: Cámara de aire. Valores de humedad relativa en la cámara simulada (azul) y monitorizada (rojo) desde mayo 2008 a mayo 2009

En el caso de la humedad relativa de la cámara de aire, también se han representado los valores simulados y monitorizados en el periodo de mayo del 2008 a mayo del 2009. Los

valores registrados tienen una variación mucho mayor de la humedad relativa. Sin embargo, los valores de simulación recogen unos valores altos pero con pocas variaciones.

La línea discontinua roja marca el valor del 80% de humedad relativa, situación crítica para el nacimiento y reproducción de algas y hongos.

Además se ha querido representar el contenido de agua o humedad absoluta de la cámara de aire. Si bien la línea de tendencia de los valores monitorizados es bastante homogénea, no así son los valores recogidos de la simulación. En ella se observan picos con valores altos de humedad absoluta. Este resultado manifiesta que, en general y en el año, los valores de simulación han obtenido resultados más elevados de humedad absoluta.

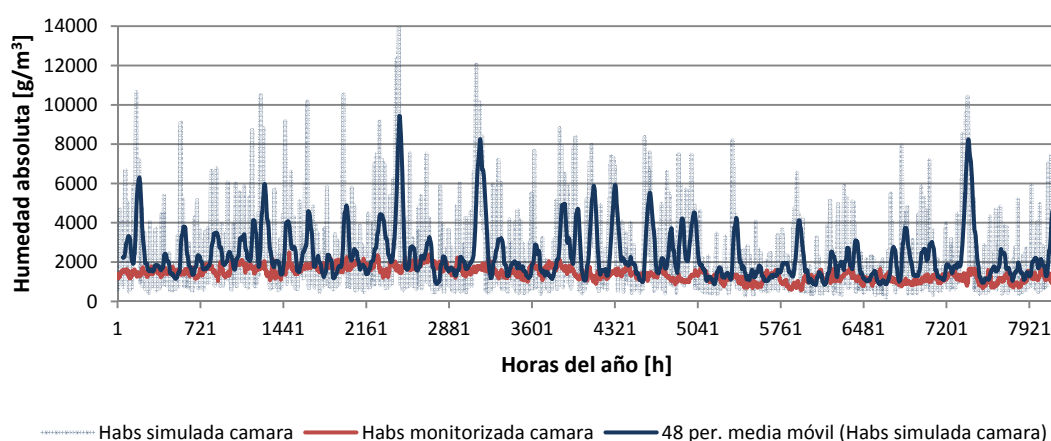


Figura VI.17: Cámara de aire. Valores de humedad absoluta en g/m^3 en simulación (azul) y monitorización (rojo) durante el año de monitorización (horas)

El movimiento del flujo de vapor de agua

Se ha querido realizar una comparación entre la presión de vapor obtenida como dato indirecto de la monitorización de la fachada ventilada con respecto a la presión de vapor obtenida del procedimiento descrito en la UNE-EN ISO 13788:2012 para el cálculo de las condensaciones.

A continuación se muestra la gráfica obtenida con los datos medios mensuales (elaborado de los datos horarios recogidos) de temperatura y humedad relativa. En la figura VI.18 se advierte un comportamiento similar de los datos reales tanto en la cámara como en el exterior. Si bien la presión de vapor exterior elaborada en el procedimiento sigue la misma tendencia que los datos recogidos, se advierte que la presión de vapor en la cámara tiene un comportamiento totalmente diferente y homogéneo durante todo el año.

Las barras naranjas muestran que los meses de junio y agosto la presión de vapor del exterior es superior a la de la cámara. Por el contrario los meses restantes es la cámara la que posee mayor presión de vapor de agua. Sin embargo, los resultados del procedimiento UNE EN ISO 13788:2002 indican un comportamiento más benévolo desde el punto de vista del contenido de vapor de agua que lo que realmente está sucediendo.

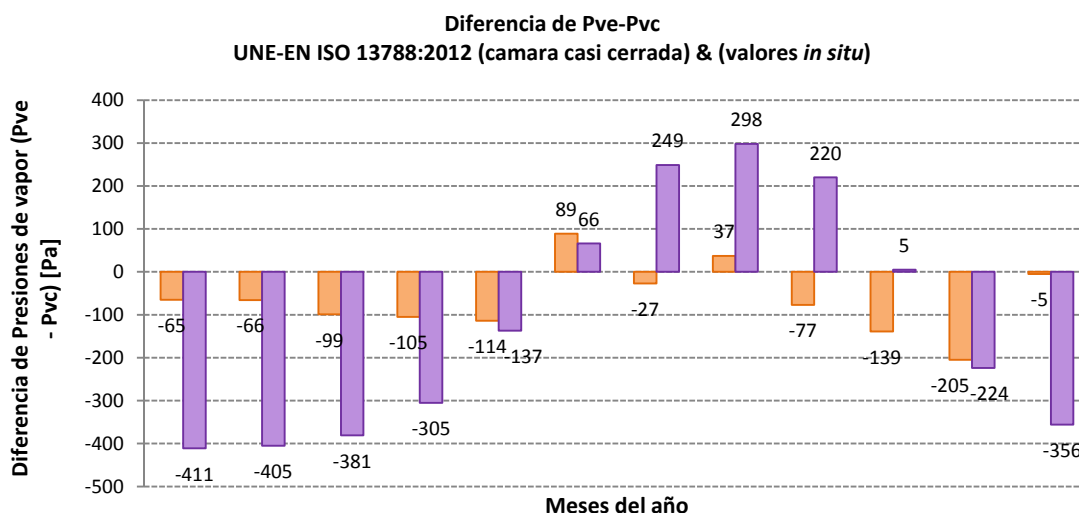


Figura VI.18: Diferencia de presiones de vapor del exterior y de la cámara casi cerrada (Pve-Pvc) mensuales obtenidos de valores monitorizados *in situ* (naranja) y del procedimiento UNE-EN 13788 (violeta)

Esta simplificación de la cámara de aire en la norma, o considerarla casi cerrada o no tenerla, no está reflejando las posibles presiones de vapor que podrían suceder. En este caso, de los doce meses analizados, diez meses la cámara de aire obtuvo más presión de vapor de agua que el exterior, significa que la tendencia del flujo de vapor de agua en la cámara intentará irse en los dos sentidos.

Se concluye que los valores de temperatura in-situ han sido similares a los del software Meteonorm. En relación a los valores de humedad relativa del periodo de mayo del 2008 a abril del 2009 in-situ han sido más variables a lo largo del año que los recogidos en el que los del software Meteonorm.

Se ha comparado los valores de temperatura en la cámara de aire simulados por el software Wufi Pro 5.3 con los valores in-situ. Se ha obtenido un coeficiente de determinación de $R^2=0,7721$, es decir, la temperatura de la cámara de aire simulada ha conseguido correlacionarse en un 87% con la temperatura de la cámara de aire in-situ. Se ha obtenido también los valores de humedad absoluta de la cámara de aire simulada y monitorizada.

Finalmente indicar que, en cuanto al movimiento de flujo de vapor de agua, el hecho de elegir la simplificación de la cámara de aire en la norma UNE EN ISO 13788:2002 hace no considerar adecuadamente las presiones de vapor que se pueden producir en la cámara de aire.

VI.2.2 DENSIDAD DE TASA DE FLUJO DE CALOR

En esta apartado se procede a analizar los resultados obtenidos en la experimentación con el análisis numérico de simulación. Para ello y para cada prueba experimental mostrada se ha hecho también análisis numérico de simulación. Como se observará a lo largo del apartado, la comparación de los resultados obtenidos de la simulación con los resultados experimentales indican que, en general, las simulaciones realizadas con el software Wufi Pro 5.3 predicen en alto grado el comportamiento del flujo de calor en los cerramientos y condiciones analizadas.

Comparación de la monitorización con la simulación: Monitorización tercera

Para realizar la comparación de los datos de densidad de tasa de flujo de calor interior, se utilizaron los datos obtenidos de la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito. Se introdujeron datos de temperatura interior y exterior, así como humedad relativa interior y exterior recogidos de la monitorización tercera y fueron introducidos en el programa de análisis numérico de simulación Wufi Pro 5.3. El objetivo era saber si este análisis numérico predecía adecuadamente los resultados obtenidos por monitorización de la densidad de tasas de flujo de calor del cerramiento. Si esto se verificaba, en concreto se podrían extraer adecuadamente conclusiones de los análisis de sensibilidad realizados anteriormente.

La figura VI.19 muestra las variables recogidas en la monitorización de temperatura interior y exterior en los días del 22 de enero al 2 de febrero del 2017. También ha sido representado el comportamiento real de la densidad de tasa de flujo de calor en verde nombrado como $q_2(\text{average})$. En puntos negros, son los resultados obtenidos del análisis numérico de simulación con el software Wufi Pro 5.3. Puede comprobarse que las líneas tienen la misma tendencia y son muy parecidas a lo largo de las horas.

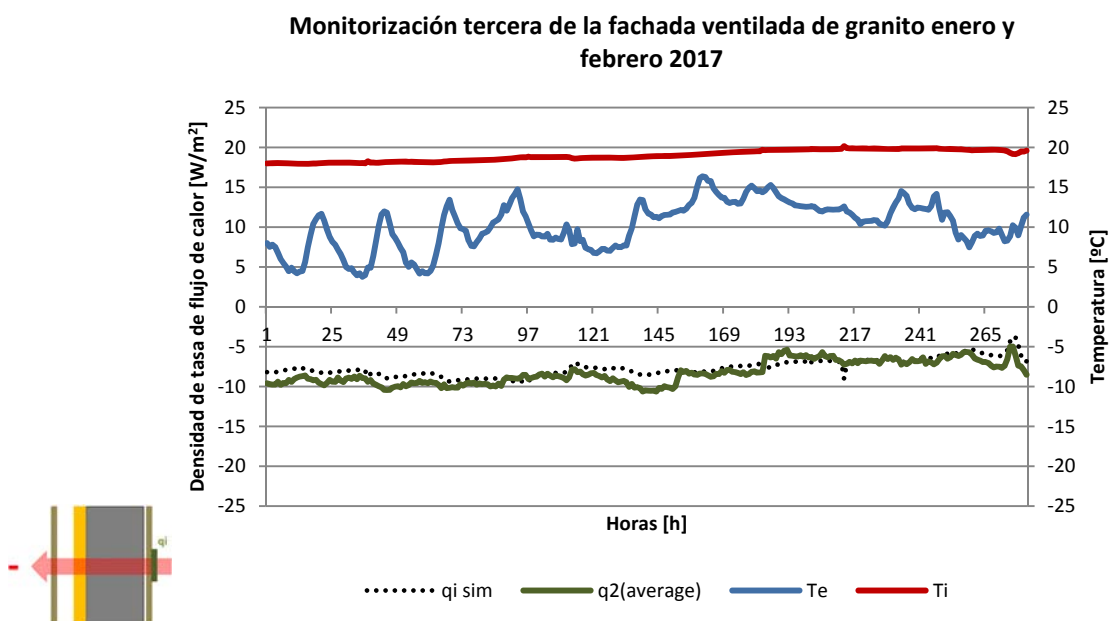
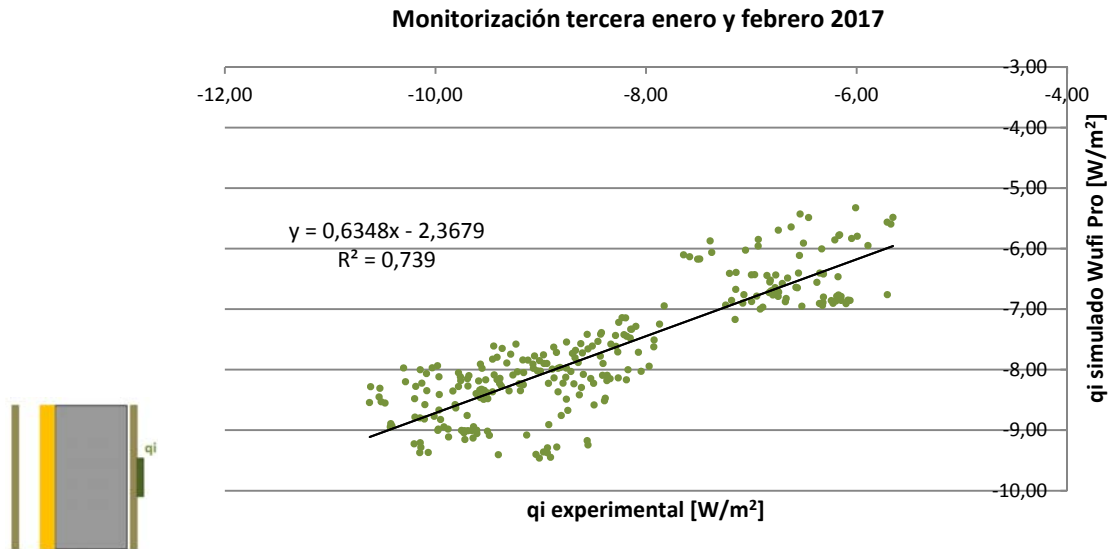


Figura VI.19: Datos de temperatura exterior e interior y densidad de tasa de flujo de calor interior simulado con Wufi Pro 5.3 y obtenido experimentalmente en las dos posiciones 2 y 3. Fachada ventilada de granito norte. Monitorización del 21 de enero al 3 de febrero del 2017

Puede observarse las tendencias de las líneas tanto del valor de q_i experimental como el q_i simulado. Sin embargo, se ha considerado utilizar la estadística para analizar si existe algún tipo de relación entre las dos variables, la densidad de tasas de flujo de calor simulada y monitorizada. Si se representan los valores del q_i de la monitorización tercera obtenido de forma experimental y se ponen en comparación con la q_i simulada, se obtiene el siguiente diagrama de dispersión. Se observa una correlación alta entre estas dos variables. Se obtuvo que el coeficiente de determinación R^2 o coeficiente cuadrado de Pearson es explicado en un $R^2=0,739$.

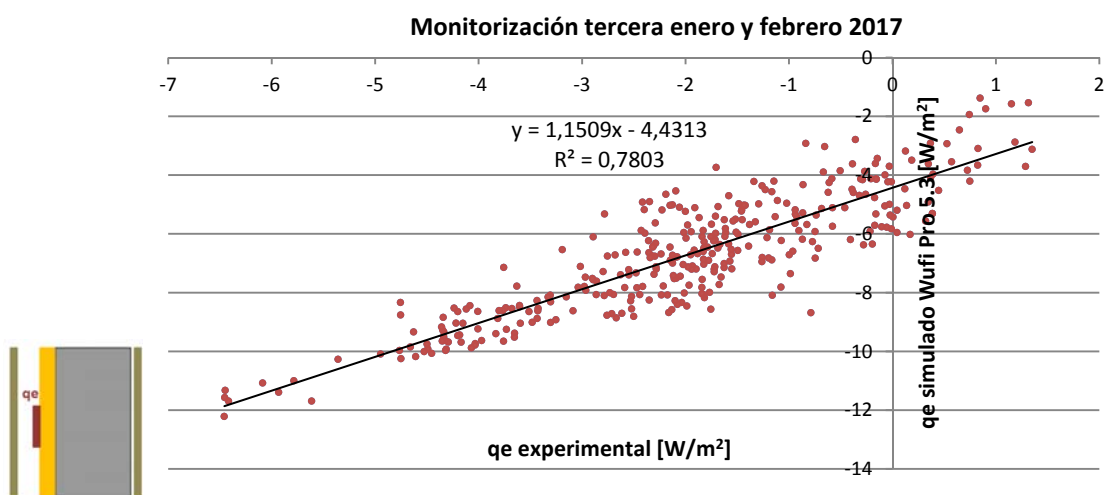


<i>q_i sim Wufi Pro 5.3</i>				<i>q_i exp</i>			
Media (St e)	Mediana	Max	Min	Media (St e)	Mediana	Max	Min
-7,64 (0,05)	-7,88	-4,77	-9,46	-8,74 (0,08)	-8,93	-5,38	-12,76

Figura VI.20: Valores de estadística descriptiva de las densidades de tasa de flujo de calor simuladas y experimentales en la monitorización tercera de enero a febrero del 2017

La tabla VI.20 informa de los valores estadísticos descriptivos de la densidad de tasa de flujo de calor interior tanto simulado como experimental. En este caso, si bien la media ha sido similar, no han sido sus valores mínimos que en el caso experimental se han mostrados superiores.

En el caso del análisis de los valores obtenidos de q_e , tanto de forma experimental como de forma simulada puede observarse que la tendencia de predicción de los valores simulados es muy parecida como en el caso de la q_i . La correlación obtenida es positiva y alta entre ambas variables. Aquí el coeficiente de determinación R^2 o coeficiente cuadrado de Pearson obtenido ha sido de un $R^2=0,7803$.



<i>q_e sim Wufi Pro 5.3</i>				<i>q_e exp</i>			
Media (St e)	Mediana	Max	Min	Media (St e)	Mediana	Max	Min
-6,54 (0,1)	-6,58	-1,37	-10,18	-1,84 (0,07)	-1,83	1,35	-4,94

Figura VI.21: Valores de estadística descriptiva de las densidades de tasa de flujo de calor simuladas y experimentales en la monitorización tercera de enero a febrero del 2017

Puede verse en la tabla de la figura VI.21 los valores estadísticos obtenidos de la densidad de tasa de flujo de calor exterior, donde se observa también las diferencias entre los valores simulados y los experimentales, tanto en el caso de la media como de la mediana y los valores máximos y mínimos.

En resumen, la densidad de tasa de flujo de calor obtenida de medidas in situ en relación a los valores simulados tiene una correlación positiva y alta. El programa de simulación numérica Wufi Pro 5.3 predice en alto grado el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor interior y exterior.

Resta discutir esas diferencias entre la realidad y la simulación. Una posible causa de esas diferencias, y ya advertida en el capítulo de monitorización in-situ, fue la existencia de algún evento como el mojado del sensor, el cual produjo variaciones en la toma de datos. El control de lo que sucede en la realidad se advierte de gran dificultad.

Comparación de la monitorización con la simulación: El caso de otros cerramientos

Se comprobó que con otro tipo de cerramiento también este programa predecía los cálculos de densidad de tasa de flujo de calor. Los resultados obtenidos de la prueba de verificación octava fueron utilizados para otra comparación. Se encontró una ecuación de regresión lineal, cuyo coeficiente de determinación era $R^2=0,91$, lo cual explicaba el 96% de varianza común entre lo simulado y lo observable, es decir, quedaba de manifiesto la alta correlación entre lo simulado y lo experimentado.

Se puede concluir que el programa de simulación ha predicho en gran medida el comportamiento de la densidad de flujo de calor interior, no sólo de la fachada ventilada de granito sino también este cerramiento cara vista. A juzgar por estos resultados obtenidos y a pesar de la modesta sensibilidad de los sensores de densidad de flujo de calor, se ha encontrado un buen grado de contraste.

Sabiendo que para la prueba de verificación octava la herramienta de software ha predicho el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor, la siguiente comparación que se hizo fue suponer que pasaría si se utilizase el cerramiento de fachada ventilada de granito en vez del cerramiento de termoarcilla monitorizado. Para conocer cuál sería su comportamiento comparado se utilizó nuevamente el programa de simulación Wufi Pro 5.3. Se decidieron incorporar en las simulaciones seis cerramientos que se encuentran definidos en la tabla siguiente. En este caso se han indicado cuatro soluciones diferentes de la fachada ventilada de granito con y sin aislamiento y considerando también una cámara de aire o un mortero tras el aplacado de granito interior final. También se ha considerado incluir en esa comparación el cerramiento de ladrillo cara vista al exterior, indicado en el código como ICv y simular un tipo de cerramiento masivo de granito indicado como código GM. La siguiente tabla expone con detalle cada cerramiento que se ha simulado

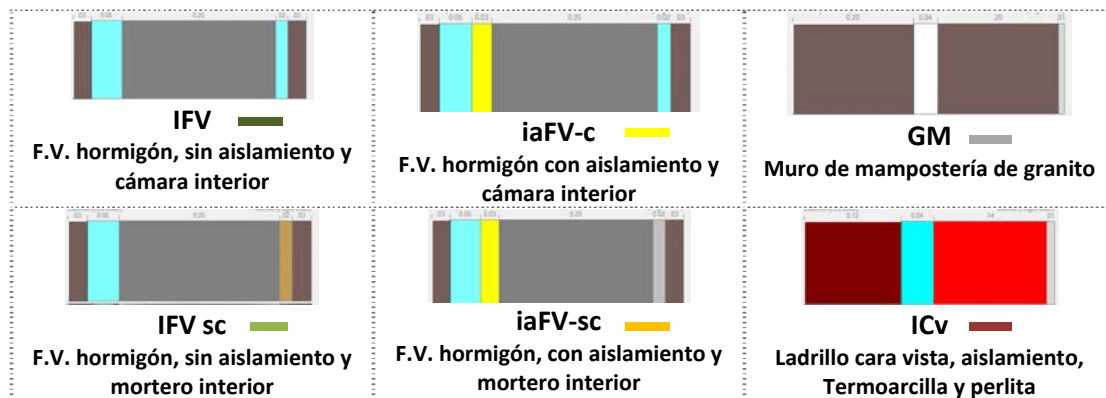


Tabla VI.7: Tipos de cerramientos analizados en la figura del flujo de calor

La respuesta puede observarse en la figura VI.22. Los colores amarillos se corresponden con el tipo de fachada ventilada con aislamiento con cámara y con mortero en contacto con el aplacado interior. En colores verdes el mismo tipo de fachada ventilada pero, en este caso, sin aislamiento. En negro y rojo es la experimentación y simulación del cerramiento con ladrillo cara vista al exterior. Finalmente en gris el tipo de cerramiento de muro masivo de granito o mampostería.

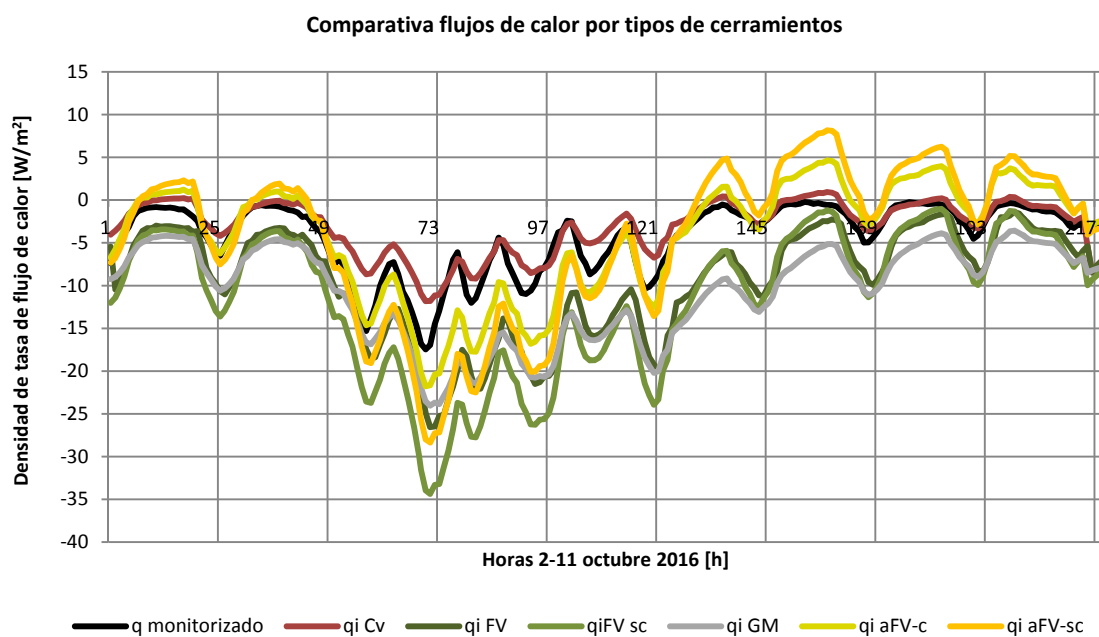


Figura VI.22: Comparativa de flujos de calor por tipos de cerramientos del 2 al 11 de octubre del 2016 en ensayo octavo

Comparando las gráficas de los comportamientos se deduce que la cámara al interior, junto al granito, reduce los valores de picos máximos de flujo de calor. El cerramiento de fachada ventilada con aislamiento reduce el flujo de calor máximo. Sin embargo, aún sigue siendo superior al cerramiento de termoarcilla y ladrillo analizado. El cerramiento de fachada ventilada con aislamiento y mortero en contacto con el aplacado interior es el que tiene mayor aporte de densidad de tasa de flujo a partir del día 8 de octubre del 2016.

Se puede deducir de esta comparativa que para una misma situación climática, el tipo de cerramiento utilizado modifica el comportamiento higrotérmico del interior, en concreto los valores de la densidad de tasa de flujo de calor. De todos los cerramientos, es el cerramiento de la fachada ventilada de granito con aislamiento el que se ha comportado con mayores valores extremos tanto de valores positivos (entrada al recinto) como de valores negativos (salida del recinto)

Para finalizar, se puede resumir los hallazgos más relevantes de esta comparación en la densidad de tasa de flujo de calor.

El programa de simulación numérica Wufi Pro 5.3 predice en alto grado los valores monitorizados. En concreto, se han extraído los coeficientes de determinación que relacionan los valores monitorizados con los simulados. En el caso de q_i fue de $R^2=0,739$ y en el caso de q_e fue de $R^2=0,78$.

En cuanto a las comparaciones de la fachada ventilada de granito con otros tipos de cerramientos, la fachada ventilada se ha comportado como el resto de cerramientos pero, sin embargo, ha sido el cerramiento con valores más positivos de densidad de tasa de flujo de calor, es decir, de ganancia. Por el contrario, también se han registrado los valores casi más extremos negativos. En otro orden, el cerramiento de termoarcilla sin cámara de aire ha sido el cerramiento que se ha comportado con menores amplitudes de valor, es decir, menores valores positivos pero también negativos.

VI.2.3 TRANSMITANCIA TÉRMICA

Comparación de los resultados de transmitancia térmica valor-U obtenidos a través del Wufi Pro 5.3 y los resultados de la monitorización.

A partir de los datos de q de la monitorización tercera, obtenidos por monitorización y aplicando el método de la media de la norma ISO 9869:2014, se obtuvo que para el cerramiento de fachada ventilada de granito una la transmitancia térmica de $0,73\text{W/m}^2\text{K}$.

Tras la obtención de este valor, nuevamente se realizaron pruebas con otro procedimiento o método, esta vez mediante diferencia de temperaturas TBM, ya explicado en el apartado anterior. Como se dijo, el salto térmico, incluso con apoyo de calefacción fue insuficiente ya que se consiguieron llegar a diferencias de temperatura alrededor de 10K . No se alcanzaron los 15K necesarios para garantizar una medida fiable, por lo que este valor fue rechazado.

En la tabla VI.8 puede advertirse los resultados obtenidos, así como el procedimiento de obtención utilizado. Se representan los valores obtenidos de las monitorizaciones realizadas. También se ha incorporado a la tabla los valores obtenidos del análisis de simulación numérica por el software Wufi Pro 5.3, con los valores de U seco, U con una humedad relativa del 80% en los materiales y la U mensual.

Valor calculado Wufi Pro 5.3 [W/m ² K]			Valor medido según método [W/m ² K]		Diferencia calculado (media)-medido (media) [%]
Useco	U80%	Um	HFM método de la media	TBM método de temperaturas	
0,63	0,65	0,77	0,73	1,05**	94,8 143,8

Tabla VI.8: Tabla comparativa de los resultados obtenidos en los ensayos y cálculos realizados de transmitancia térmica de la fachada ventilada de granito orientada al norte en A Coruña. ** (Valor rechazado por $\Delta T \approx 10K$)

En la figura VI.23 se han representado todos los valores de las transmitancias térmicas mensuales U obtenidas por simulación y los valores de U en seco y U al 80% de humedad a lo largo de un año.

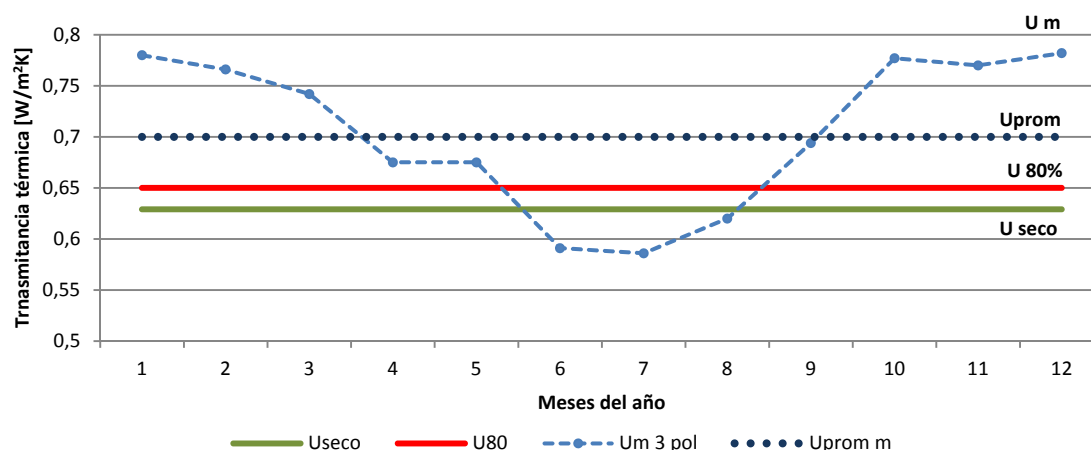


Figura VI.23: Valores de transmitancia térmica estacionaria U seco, U 80%HR, transmitancia térmica U mensual y transmitancia térmica mensual promedio U_{prom} para la simulación con aislamiento térmico de 3cm de poliuretano. Fachada ventilada de granito de orientación norte en A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Se observa claramente que los meses de invierno poseen valores de transmitancia térmica más elevados. Por el contrario los valores de verano son menores a los obtenidos por cálculo simple, U_{seco} y U_{80} . En cuanto a las diferencias porcentuales entre los valores mensuales y el obtenido de la U_{80} de la figura anterior se llega en los meses de invierno a un incremento de casi un 20% con respecto al valor U_{80} . Por el contrario en los meses de verano se mejora en casi un 10% el comportamiento de la transmitancia térmica U_{80} calculada.

Con la monitorización tercera se ha obtenido un valor monitorizado de $0,73W/m^2K$, muy similar al obtenido por simulación en el mes de febrero de $0,77 W/m^2K$ con tan sólo una diferencia del 6%. Sin embargo, la diferencia es manifiesta en relación al cálculo tanto de U_{seco} como de U_{80} , donde oscilan entre un **4% y hasta un 16,8%**. En todo caso, estos valores se han desviado en más del 15% del valor de transmitancia térmica calculada según CTE y la obtenida en la monitorización tercera del mes de enero-febrero 2017.

La diferencia del valor pudiera ser explicada por un contenido de humedad ambiental y/o de los materiales debido al clima expuesto. Centrándose en la hipótesis que la humedad juega un papel determinante en la propiedad de conductividad térmica λ , parece evidente la merma en la capacidad de aislar del poliuretano proyectado. De hecho, solamente el cálculo de transmitancia térmica con un contenido de humedad en los materiales de 80% el incremento es de un 4%. La variación del contenido de humedad en el mismo puede hacer incrementar su valor, y como consecuencia el valor de la transmitancia térmica.

Finalmente se han calculado los kWhm²/año de pérdida de energía en el cerramiento de fachada ventilada de granito según los distintos valores de transmitancia térmica U obtenidos. Estos cálculos se han representado en el diagrama de barras de la figura VI.24. A la izquierda se han dispuesto las pérdidas de energía según el valor de transmitancia considerado. Se ha elegido una temperatura de confort de 18°C, por lo que los meses de julio, agosto y septiembre no han sido considerados en el cálculo. Como temperatura exterior se han considerado los valores normales de Agencia Española de Meteorología de A Coruña. Se deduce que la pérdida de energía más desfavorable ha sido el considerado por los valores mensuales de U obtenidos de software Wufi Pro 5.3. En el diagrama de barras de la derecha se expresan las diferencias de valores con respecto al valor de la transmitancia térmica en seco calculada.

Se resume que, en este caso, el utilizar los valores mensuales de transmitancia térmica U, situación mucho más cercana al comportamiento real, supone un incremento de un 15,6% en las pérdidas de energía a ser consideradas en el cerramiento de fachada ventilada de granito orientada al norte en la localización de A Coruña.

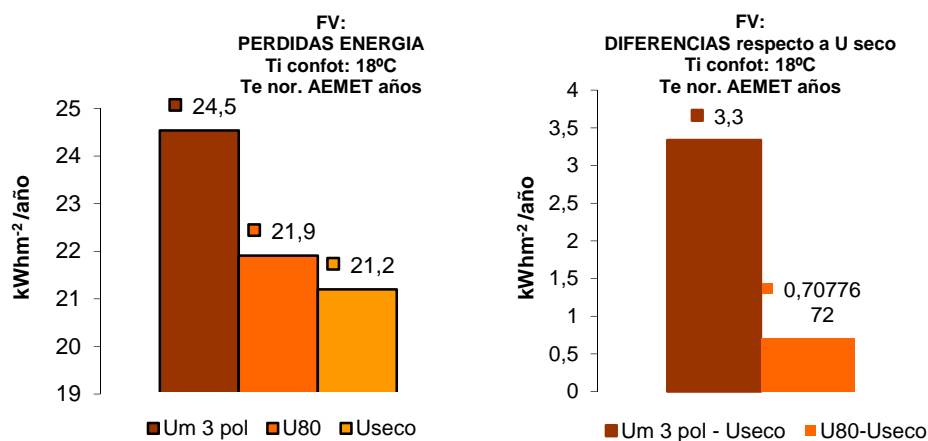


Figura VI.24: Comparativa de pérdidas de energía a partir de la transmitancia térmica dependiendo del valor U de cálculo o de monitorización de la fachada ventilada de granito orientada al norte en A Coruña

Se concluye que, el valor monitorizado de 0,73W/m²K (recogido de los valores climáticos in-situ), es muy similar al obtenido por simulación en el mes de febrero utilizando valores climáticos normales. Sin embargo, la diferencia en relación al cálculo tanto de U_{seco} como de U₈₀, oscila entre un 4% y hasta un 16,8%. En todo caso, estos valores se han desviado en más del 15% del valor de transmitancia térmica calculada según CTE y la obtenida en la monitorización tercera del mes de enero-febrero 2017 y simulación con el software Wufi Pro 5.3.

Sin embargo, para la obtención del valor U ha sido muy dificultoso y engorroso observando las múltiples condiciones que se deberían cumplir a la vez. Además cuando se intentó realizar la monitorización por el método de diferencia de temperaturas TBM, se obtuvo un valor superior y que finalmente se descartó por la fiabilidad de la medida, al no haber llegado al necesario salto térmico de 15K.

El hecho de utilizar unos valores de transmitancia térmica más parecidos a los obtenidos en la monitorización, supone considerar un incremento de las pérdidas de energía del cerramiento de fachada ventilada de granito de un 15,6% con respecto a los valores de cálculo, es decir, pasar de 21,2 kWhm²/año a 24,5kWhm²/año.

VI.3 SÍNTESIS CRÍTICA DEL CAPÍTULO VI

Durante el desarrollo del capítulo VI de comparación de resultados de monitorización y análisis numérico de simulación, se cumplió el objetivo principal de este capítulo que trataba de verificar y comparar esos resultados térmicos e hídricos obtenidos según los métodos utilizados.

. Para cumplir el primer objetivo específico se desarrolló un conjunto de pruebas de verificación y contraste alternativas que diesen respuesta y argumentasen los resultados obtenidos. También se evaluó la validez de los resultados obtenidos en la monitorización higrorémica

Este apartado tuvo dos formas de evaluar la validez de los resultados, mediante el diseño de pruebas de **verificación in situ o monitorizaciones y de análisis numérico** con simulaciones.

En el caso de las **monitorizaciones**, se desarrollaron 16 pruebas de verificación y contraste experimentales para dar respuesta a las dudas y las preguntas planteadas tras los resultados obtenidos.

La **primera pregunta** exponía si se había medido bien. Para ello se definieron las pruebas primera, segunda y decimocuarta.

La prueba primera, sirvió para testar si un sensor al azar de densidad de tasa de flujo de calor estaba midiendo adecuadamente. Conociendo un calor suministrado a una probeta de acero, se comprobó que el calor medido era el calor suministrado y la diferencia era aceptable.

La segunda prueba de verificación tuvo como objetivo evaluar la forma de fijación a la pared, dadas las diferentes formas encontradas en la bibliografía y recomendaciones del fabricante. Se comprobó que la sujeción y pegado influye en la fiabilidad de los datos obtenidos.

La decimocuarta prueba simplemente verificó la importancia de la interferencia de la parte convectiva en la medida de la densidad de tasa de flujo de calor, disponiendo de tapados y/o protecciones para evitar la convección inmediata al sensor y observar su repercusión alrededor del 200%.

La **segunda pregunta** argumentaba si se existían otros métodos para la evaluación de la transmitancia térmica y si era posible realizar otras transmitancias térmicas en otros cerramientos. Para ello, se realizaron las pruebas tercera, cuarta, quinta, sexta y decimotercera.

En la tercera prueba tuvo como finalidad monitorizar el valor de q_i en un local de 3m^2 con cerramiento de termoarcilla, poliestireno extrusionado y ladrillo cara vista y controlar el aporte energético mediante calefacción, el mantenimiento y su reducción. Se observó el comportamiento del q_i obtenido en estas tres etapas. Se obtuvo un aumento del valor de q_i en dirección salida del local al incrementar la temperatura interior. Cuando fue finalizado, el q_i disminuyó llegando a valores cercanos a 0. La

tercera prueba también fue importante para hallar el R del cerramiento. Los datos obtenidos bajo el procedimiento del método de la media de la ISO 9869:2014 mostraron una diferencia con los datos de cálculo de apenas un 4%.

Con respecto a la cuarta, quinta y sexta prueba de verificación y contraste se realizaron en la fachada ventilada de granito orientada al norte de A Coruña. El objetivo era la obtención nuevamente del valor U, puesto que existían grandes diferencias de las obtenidas en la monitorización de febrero y marzo del 2016. Se utilizó un método alternativo por diferencias de temperaturas. Sin embargo, se obtuvo una medida similar a la U prom del mes de febrero y marzo del 2016, $U=1,05 \text{ W/m}^2\text{K}$, que sigue suponiendo un 44% más que el valor calculado. Se pudo verificar que la toma de datos durante dos días para el método de la media por sensores de flujo de calor no es suficiente, dando un valor muy dispar.

La decimotercera prueba de verificación y contraste analizó otro cerramiento diferente. En este caso fue un cerramiento compuesto de una pasta de granito de 17cm, un aislamiento de Poliestireno extrusionado de 4 cm y otra pasta de granito de 17cm. De los resultados de q_i monitorizados se dedujo que el comportamiento de este cerramiento era similar al otro cerramiento de Termoarcilla analizado que suponía tener contrafase del movimiento de densidad de tasa de flujo de calor interior en relación a la temperatura exterior.

La **pregunta tercera** reflexionaba sobre el hecho que existiese un patrón característico de la densidad de tasa de flujo de calor en un cerramiento. Se diseñaron las pruebas séptima, octava, novena, décima, decimoprimera, decimosegunda y decimotercera.

En el caso de las pruebas séptima, octava y novena, extrajo nuevamente el valor de transmitancia térmica del cerramiento, esta vez de $U=0,52 \text{ W/m}^2\text{K}$. Se reflejó también el comportamiento del flujo de calor exterior y los movimientos de sentido que se habían producido. Se explicó como era el patrón de comportamiento tanto de la densidad de tasa de flujo de calor interior y exterior (q_i y q_e) durante un día, por la noche y por el día. También fue realizada la transmitancia térmica del vidrio doble.

En la prueba décima se obtuvo un nivel de confianza de los resultados de un $N=95\%$. Con estos valores, las variables monitorizadas se sometieron a pruebas estadísticas de regresión para comprobar que variable de las monitorizadas es la que explicaba en mayor medida la q_e y la q_i . Los resultados concluyeron que en esta prueba, el parámetro que en mayor medida explica la q_e es el incremento de temperaturas. El q_i es explicado en su mayor medida por la humedad relativa interior de la sala.

Las pruebas siguientes undécima y duodécima prueba recogieron datos de la densidad de tasa de flujo de calor interior y exterior, q_e y q_i . Se dedujo el comportamiento de flujo de calor del vidrio que supone que el q_i está en fase con la temperatura exterior.

La **última pregunta** versaba sobre si existía una influencia de la humedad en el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor interior. La prueba decimosexta se puso en marcha para dar respuesta a ello.

Con los datos recogidos de monitorización de la prueba novena se realizó un análisis de regresión para explicar la variable independiente q_i . Los resultados confirmaron que la humedad relativa interior era la primera variable dependiente para explicar el comportamiento de q_i .

La prueba decimosexta realizada supuso evaluar si el sensor de densidad de tasa de flujo de calor variaba su medición si se incorporaba agua y/o humedad en el ambiente y en la superficie del granito del cerramiento. Los resultados corroboraron una variación importante en los valores de densidad de tasa de flujo de calor al pulverizar agua en el ambiente.

También las simulaciones realizadas reflejaron la importancia de elegir adecuadamente los materiales para su mayor o menor contenido de humedad en el cerramiento. Además se mostró la influencia que el aporte adicional de humedad.

En el apartado de **comparación de resultados**:

. El objetivo específico de este segundo apartado del capítulo VI fue confrontar valores de cuantificación higrotérmica y de la transmitancia térmica de la fachada ventilada según los resultados experimentales y de simulación.

. Los hallazgos relativos al **ambiente** indican que los valores de temperatura in-situ han sido similares a los del software Meteonorm. En relación a los valores de humedad relativa del periodo de mayo del 2008 a abril del 2009 in-situ han sido más variables a lo largo del año que los recogidos en el que los del software Meteonorm.

Se ha comparado los valores de temperatura en la cámara de aire simulados por el software Wufi Pro 5.3 con los valores in-situ, obteniendo un coeficiente de determinación entre los dos valores de $R^2=0,7721$.

Finalmente indicar que, en cuanto al movimiento de flujo de vapor de agua, el hecho de elegir la simplificación de la cámara de aire hace no considerar adecuadamente las presiones de vapor que se pueden producir en realidad.

. Los valores de **densidad de tasa de flujo de calor** hallados con el programa de simulación numérica Wufi Pro 5.3 han predicho en alto grado los valores monitorizados. En concreto, se han extraído los coeficientes de determinación que relacionan los valores monitorizados con los simulados. En el caso de q_i fue de $R^2=0,739$ y en el caso de q_e fue de $R^2=0,78$.

En cuanto a las comparaciones de la fachada ventilada de granito con otros tipos de cerramientos, la fachada ventilada se ha comportado como el resto de cerramientos pero, sin embargo, ha sido el cerramiento con valores más positivos de densidad de tasa de flujo de calor, es decir, de ganancia. Por el contrario, también se han registrado los valores casi más extremos negativos. En otro orden, el cerramiento de termoarcilla

sin cámara de aire ha sido el cerramiento que se ha comportado con menores amplitudes de valor, es decir, menores valores positivos pero también negativos.

. Con respecto a los valores de **transmitancia térmica**, el valor monitorizado de $0,73\text{W/m}^2\text{K}$ (recogido de los valores climáticos in-situ), fue muy similar al obtenido por simulación en el mes de febrero utilizando valores climáticos normales. Sin embargo, la diferencia en relación al cálculo tanto de U_{seco} como de U_{80} , osciló entre un 4% y hasta un 16,8%. En todo caso, estos valores se han desviado en más del 15% del valor de transmitancia térmica calculada según CTE y la obtenida en la simulación.

El hecho de utilizar unos valores más parecidos a los obtenidos en la monitorización, supone considerar un incremento de las pérdidas de energía del cerramiento de fachada ventilada de granito de un 15,6% con respecto a los valores de cálculo, es decir, pasar de $21,2\text{ kWhm}^2/\text{año}$ a $24,5\text{ kWhm}^2/\text{año}$.

Se concluye que los resultados de monitorización correlacionaron en alto grado con los valores obtenidos por simulación. De ello se puede decir que el programa de simulación Wufi Pro 5.3 es una herramienta muy útil que puede ayudar a la predicción del comportamiento real. En relación a la transmitancia térmica, se ha obtenido una desviación del 16,7% entre los diferentes valores, de cálculo y simulados-monitorizados. La humedad relativa se ha encontrado ser un parámetro que influye en el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor interior y como consecuencia en la variación de la transmitancia térmica del cerramiento.

VI.3 CRITICAL SYNTHESIS OF CHAPTER VI

During the development of chapter VI, the main objective was achieved. It was tried to verify and compare those thermal and moisture results obtained according to methods used: a comparison of monitoring results and a numerical simulation analysis

. In order to meet the first specific objective, a set of alternative verification and contrast tests were developed. Results obtained in hygrothermal monitoring were also validated

This section had two ways of checking validity of results, through the design of verification tests in situ or monitoring and numerical analysis with simulations.

In the case of the monitoring, 16 tests of experimental verification and contrast were developed to answer doubts and questions posed after the obtained results.

The **first question** was whether it had been properly measured. The first, second and fourteenth tests were defined.

The first test, served to prove whether a random sensor of heat flux density was measuring properly. Knowing a heat supplied to a steel specimen, it was found that heat measured was the heat supplied and the difference was acceptable.

The second test of verification had as objective to evaluate the form of fixation to the wall, given the different forms found in the bibliography and recommendations of the manufacturer. It was verified that the fastening and gluing influence the reliability of obtained data.

The fourteenth test simply verified the importance of convective part interference in the measurement of the heat flow rate density, having coverings and/or protections to avoid immediate convection to the sensor and it could be observed its repercussion around 200%.

The **second question** argued whether there were other methods for assessment of thermal transmittance and whether other thermal transmittance could be performed in other envelopes. For these reasons, third, fourth, fifth, sixth and thirteenth tests were performed.

In the third test, the purpose of this study was to monitor the value of q_i in a 3m^2 room with a thermo-clay brick, extruded polystyrene and face brick and control the energy supply through heating, maintenance and reduction. The behavior of the q_i obtained in these three stages was observed. An increase in the value of q_i in the outlet direction of the room was obtained by increasing the interior temperature. When it was finished, the q_i decreased to values close to 0. The third test was also important to find the R of the envelope. Data obtained using the ISO 9869: 2014 method showed a difference with the calculation data of only 4%.

With respect to the fourth, fifth and sixth tests of verification and contrast were performed on the ventilated façade of granite oriented north of A Coruña. The objective was to obtain the U value again, since there were large differences from

those obtained in the monitoring of February and March of 2016. An alternative method was used for differences in temperature. However, a measure similar to the U prom of the month of February and March of 2016, $U = 1,05\text{W/m}^2\text{K}$, was still assumed to be 44% higher than the calculated value. It was verified that the data collection for two days for the method of the average by heat flow sensors was not enough, giving a deviating value.

The thirteenth test of verification and contrast analyzed another envelope. In this case it was an envelope composed of a granite paste of 17cm, an insulation of extruded polystyrene of 4cm and another granite paste of 17cm. From the results of q_i monitored it was deduced that the behavior of this envelope was similar to the other thermal-clay brick envelope analyzed that supposed to have a counter phase of the movement of density of internal heat flow rate in relation to the outside temperature.

The **third question** reflected on the fact that there is a characteristic pattern of the rate of heat flux in an envelope. The seventh, eighth, ninth, tenth, eleventh, twelfth and thirteenth tests were designed.

In the case of the seventh, eighth and ninth tests, it again extracted the thermal transmittance value of the envelope, this time of $U = 0,52\text{W/m}^2\text{K}$. It also reflected the behavior of the external heat flow and movements that had occurred. The pattern of behavior of both indoor and outdoor (or q_i and q_e) heat flux density was explained for one day, night and day. Thermal transmittance of the double glass was also performed.

In the tenth test, a confidence level of the results of an $N = 95\%$ was obtained. With these values, variables monitored were subjected to statistical regression tests to verify that the variable of the monitored ones is the one that explained to a greater extent the q_e and the q_i . Results concluded that in this test, the parameter that to a greater extent explains the q_e is the increase of temperatures. The q_i is explained to a greater extent by the interior relative humidity of the room.

The following eleventh and twelfth test tests collected data on the internal and external heat flow rate density, q_e and q_i . It was deduced the heat flow behavior of the glass which assumes that the q_i is in phase with the outside temperature.

Last question was whether there was an influence of moisture on the behavior of the internal heat flow rate density. The sixteenth test was set to respond to this.

With data collected from monitoring the ninth test, a regression analysis was performed to explain the independent variable q_i . Results confirmed that the relative humidity was the first dependent variable to explain the behavior of q_i

The sixteenth test involved the evaluation of whether the heat flux density sensor varied its measurement if water and/or moisture were incorporated into the environment and the granite surface of the envelope. Findings corroborated a significant variation in the values of heat flow rate density when spraying water into the environment.

Also simulations carried out reflected the importance of choosing appropriate materials for their greater or lesser moisture content in the envelope. In addition, the influence of the additional moisture intake was shown.

In the **comparison section of results**:

. The specific objective of this second section of chapter VI was to compare values of hygrothermal quantification and thermal transmittance of the open-joint ventilated façade according to the experimental and simulation results.

. The findings related to the **environment** indicate that values of in-situ temperature have been similar to those of Meteonorm software. In relation to values of relative humidity of the period from May 2008 to April 2009, they have been more variable throughout the year than those collected in the Meteonorm software.

The temperature values in the air cavity simulated by the Wufi Pro 5.3 software were compared with the in-situ values, obtaining a determination coefficient between the two values of $R^2 = 0,7721$.

Finally, it should be pointed out that, in regard to the movement of water vapor flow, choosing the simplification of the air cavity does not adequately account for the vapor pressures that can actually occur.

. The **heat flux density values** found with the Wufi Pro 5.3 numerical simulation program have predicted to a high degree the values monitored. In particular, the determination coefficients that relate the monitored values to the simulated ones have been extracted. In the case of q_i it was $R^2 = 0,739$ and in the case of q_e was $R^2 = 0,78$.

As for comparisons of the open-joint ventilated façade of granite with other types of envelopes, ventilated façade has behaved like the rest of the envelopes but, however, it has been the closure with more positive values of heat flow rate density. On the contrary, the almost more negative values have also been recorded. In another order, the envelope of thermo-clay brick without air cavity has been the envelope that has behaved with smaller amplitudes of value, that is to say, lower values positive but also negative.

. Regarding the values of **thermal transmittance**, the monitored value of $0,73\text{W/m}^2\text{K}$ (collected from in-situ climatic values) was very similar to that obtained by simulation in the month of February using normal climatic values. However, the difference between the calculation of both U_{seco} and U_{80} , ranged between 4% and up to 16.8%. In any case, these values have deviated by more than 15% of the value of thermal transmittance calculated according to C.T.E. and that obtained in the simulation.

The use of values more similar to those obtained in the monitoring, supposes to consider an increase of the energy losses of the ventilated façade of granite of 15,6% with respect to the values of calculation, that is to say, to pass from $21,2\text{ kWhm}^2/\text{year}$ to $24,5\text{ kWhm}^2/\text{year}$.

Finally, it can be said that monitoring results correlated to a high degree with values obtained by simulation. From this it can be said that the Wufi Pro 5.3 simulation program is a very useful tool that can help predicting real hygrothermal behavior. In relation to the thermal transmittance, a deviation of 16,7% was obtained between different values, calculated and simulated-monitored. Relative humidity has been found to be a parameter that influences the behavior of the density of internal heat flow rate and as a consequence in the variation of the thermal transmittance of the envelope.

VII

DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES DE DISEÑO

Durante los capítulos anteriores, se ha procedido por primera vez al análisis higrotérmico del sistema de fachada ventilada de granito para el clima de A Coruña (Csb). Este análisis se ha realizado a partir de los resultados obtenidos de mediciones in situ y también del análisis numérico de simulación con el software Wufi Por 5.3.

En este capítulo los resultados y comparaciones obtenidas son confrontados ahora con otros estudios realizados por la comunidad científica con el objetivo final de definir el comportamiento higrotérmico característico, destacar los hallazgos relevantes y establecer unas recomendaciones. Este objetivo principal se lleva a cabo a lo largo de este capítulo y a través de los objetivos específicos siguientes:

- . En primer lugar, describir el comportamiento ambiental e higrotérmico característico observado en la fachada ventilada
- . En segundo lugar, describir y argumentar los hallazgos más relevantes en relación a los aspectos hídricos y térmicos
- . Finalmente, establecer unas recomendaciones a partir de la comparación de los resultados y los hallazgos encontrados en el comportamiento higrotérmico.

Además de responder a todos estos objetivos, las discusiones de este capítulo permitirán dar respuestas justificadas a las preguntas de investigación propuestas inicialmente.

Con este fin, este capítulo VII se ha estructurado en tres partes. En la primera parte se discuten los resultados obtenidos del ambiente exterior y de la cámara. En segundo lugar, se argumentan los correspondientes al cerramiento y a su capacidad de secado y mojado. Y en tercer lugar, se discute la densidad de tasa del flujo de calor obtenida a partir de los resultados calculados y los medidos *in situ*. Todos estos resultados y su comparativa son argumentados y contrastados por los obtenidos por la comunidad científica.

La segunda parte del capítulo inicia con una recopilación razonada de una serie de parámetros considerados sensibles para el mejor comportamiento higrotérmico, que en definitiva, es

facilitar el secado del cerramiento. Esta parte termina realizando una propuesta de recomendaciones según la capa de fachada ventilada analizada para que, a través de parámetros sencillos, se pueda predecir si el comportamiento en este clima va a ser adecuado. El capítulo remata con una síntesis crítica.

VII.1 COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

Se trata de demostrar el objetivo principal de la investigación que es que la fachada ventilada de granito orientada al Norte, se comporta desde el punto de vista higrotérmico en la realidad, tal y como se ha indicado en la norma, los cálculos teóricos y los estudios precedentes.

Como se indicó anteriormente, este estudio se manifiesta relevante y característico por la novedad que significa analizar el binomio fachada-clima, en concreto las prestaciones de un aplacado de piedra ventilado en clima Csb (A Coruña). En la bibliografía técnica apenas se encontraron investigaciones que relacionen el comportamiento higrotérmico de fachadas con el clima. Lo más parecido a nuestro estudio son algunos trabajos higrotérmicos en Noruega Nore (2010), pero en una clasificación climática diferente. El clima de A Coruña, es un clima más templado y, como consecuencia tiene mayor capacidad para contener vapor de agua en el ambiente y en los materiales. Tampoco se procede al análisis del sistema constructivo estudiado, sino el característico de la construcción en Noruega “tipo *rainscreen wall*” ni la misma tipología constructiva y de materiales.

Straube y Finch (2007) realizaron estudios higrotérmicos en Vancouver, en este caso, con la misma clasificación climática Koppen Geiger que A Coruña Csb. Sin embargo, también estudian una tipología constructiva de *rainscreen wall* diferente a la típica forma de construcción actual en el noroeste peninsular Ibérico. Otros estudios españoles e italianos recogidos sobre fachada ventilada, analizan el sistema constructivo pero realizan estudios vinculados a la energía y refrigeración que causa la cámara de aire en la fachada ventilada pero no por problemas de ingreso de agua. Se refieren a clasificaciones climáticas más cálidas pero también con menos cantidad de humedad en el ambiente y a precipitaciones.

Ciñéndonos a los **datos recogidos del comportamiento higrotérmico** que ha tenido la fachada ventilada de granito orientada al norte y objeto de análisis, con todos los datos recogidos a lo largo de la investigación realizada, se ha encontrado que:

En relación a la fluctuación de la **densidad de tasa de flujo de calor**, el sensor del interior ha recogido en enero y febrero de 2017 valores en sentido salida de la sala de grados. El valor medio obtenido ha sido de $-8,74\text{W/m}^2$. En el caso del movimiento de la densidad de tasa de flujo de calor en el exterior, las condiciones mostradas fueron de valor inferior a los valores recogidos en el interior, de aproximadamente $-1,84\text{W/m}^2$. La figura VII.1 muestra en flechas rojas el sentido de la densidad de tasa del flujo de calor.

En el caso del **movimiento del flujo de vapor de agua**, mediante el estudio de las presiones de vapor de agua en cada ambiente, se ha observado que siempre la sala está con mayor presión de vapor. Ello provoca un movimiento del vapor de agua contenido en el ambiente hacia el exterior. El movimiento de vapor de agua puede observarse en el siguiente esquema con las flechas azules, hacia el exterior.

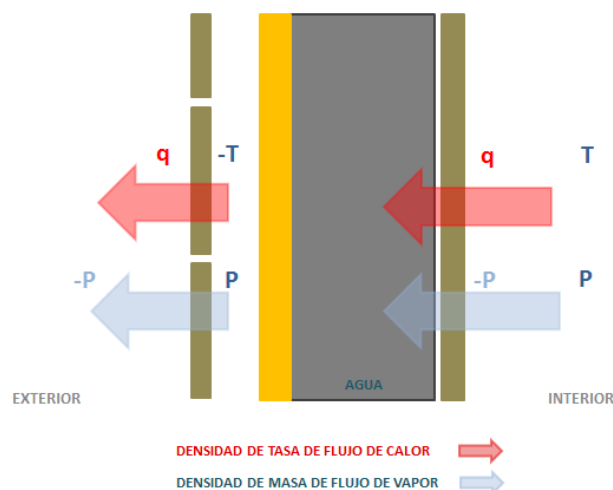


Figura VII.1: Comportamiento de la densidad de flujo de calor y del movimiento de presión de vapor en el cerramiento de fachada ventilada de granito analizada en condiciones de invierno

Pero cuales serían las situaciones en las que se podría producir una entrada de densidad de tasa de flujo de calor

Una **posible explicación de este comportamiento higrotérmico** plantea que puede existir, en ciertos momentos, humedad en el hormigón debido a su continuidad con la cimentación y sótanos o por su posible baja permeabilidad al vapor de agua. En algunas partes se muestra estar en contacto el muro de hormigón con el terreno. Es decir, puede existir más humedad en el hormigón que la del ambiente y/o de construcción. Además ese vapor de agua del interior del hormigón puede llegar a condensarse a medida que baja la temperatura dentro del material y la capacidad de contener vapor de agua baja. El vapor de agua intenta moverse hacia el exterior pero en este proceso se produce una condensación. Esta condensación tiene asociada la liberación de calor, también llamado calor latente de condensación. Esta energía podría elevar la temperatura superficial y provocar que esa densidad de tasa de flujo de calor sea en dirección entrada hacia la sala.

La prueba de verificación y contraste décimo sexta demostró la situación opuesta, incorporando gotas de agua en el ambiente inmediato al sensor y posadas sobre la superficie del cerramiento de granito, se encontró un aumento de valor en el movimiento de flujo de calor hacia el exterior debido al calor latente de vaporización. Esto quiere decir que el valor manifiesta un robo de energía necesario para cambiar de estado líquido a vapor de agua en la superficie del granito, obteniendo como resultado la bajada de la temperatura superficial del material. Esto ha sido ya expresado por Treschel (1994) como los efectos de cambio de fase existen y se manifiestan mediante la explicación de cinco procesos.

Pero la situación más probable de un movimiento de la densidad de tasa de flujo de calor hacia el interior del edificio sería el aumento de temperatura exterior, llegando a ser inferior a la del interior del salón de grados. Esta situación ha podido suceder en periodos de verano.

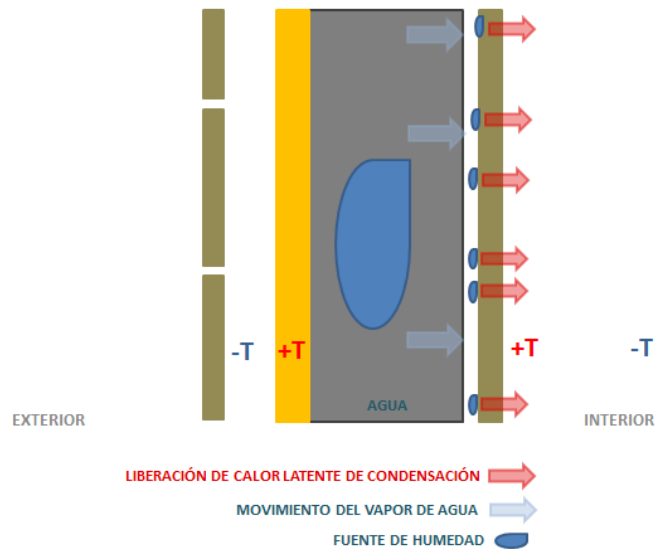


Figura VII.2: Posibles movimientos de humedad en el hormigón hacia el interior de la sala

La figura VII.2 explica el proceso de liberación del calor latente que podría suceder en algún momento en la fachada ventilada de granito analizada.

Otra posible **explicación de este comportamiento higrotérmico** de la fachada ventilada, supondría aceptar fuentes de calor adicionales, ya que como se observó en los datos recogidos en la simulación, la densidad de tasa de flujo de calor se elevaba consiguiendo valores positivos, hacia el interior de la sala. La primera podría ser la radiación de la calefacción del local que se sitúa bajo el salón de grados. La segunda situación es el aporte de una fuente de calor debido a la subestructura de aluminio en contacto con el hormigón. También podría ser una combinación de ambos aportes de calor.

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas indican que el q_i ha sido variable cuando se sometía a un aporte de calor adicional, siendo ésta una probable explicación del comportamiento.

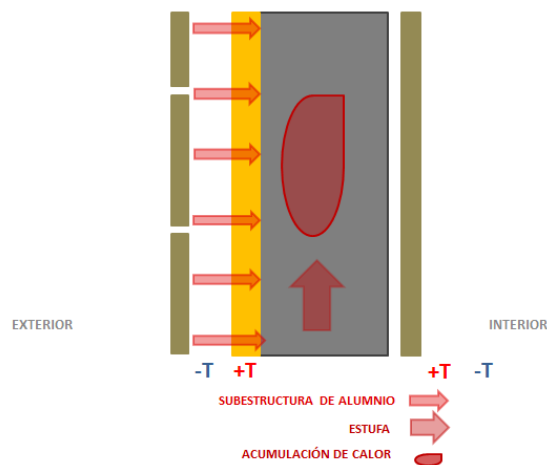


Figura VII.3: Posible explicación del fenómeno de elevación de la temperatura superficial interior del cerramiento

Una tercera y con mayor probabilidad posible explicación de los valores positivos sería la inercia de calentamiento de la masa fundamentalmente de hormigón armado.

Una vez explicado un posible comportamiento higrotérmico, a continuación se presentan los principales hallazgos. Estos hallazgos se han organizado en tres ámbitos que son el ambiente, el cerramiento y finalmente la densidad de tasa de flujo de calor. El ambiente exterior o clima analiza y discute la alta humedad relativa encontrada en el ambiente y en la cámara de aire, se estudia en concreto la primera línea de defensa del cerramiento u hoja exterior y se analizan los patrones higrotérmicos diarios observados según las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno. En el segundo ámbito del cerramiento se explican los procesos de mojado y secado y la dificultad con la que se produce ese secado para altas condiciones hídricas. Se destaca también algunas propiedades que influyen claramente en el empeoramiento del secado. Finalmente la tercera hace un estudio exhaustivo de la densidad de tasa de flujo de calor, detectándose que parte de ese flujo de calor se corresponde a la influencia de la humedad y cómo los valores obtenidos en los distintos cálculos y de la monitorización del valor de transmitancia térmica divergen. En este apartado, y en definitiva, se da respuesta a las preguntas de investigación

VII.1.1 AMBIENTE

En relación al ambiente se da cuenta de los hallazgos más relevantes obtenidos en esta tesis doctoral.

1. **La humedad relativa ambiental en la hoja exterior del aplacado de granito ha sido durante 4961 horas en el año mayor del 74% de humedad relativa con riesgo de nacimiento de cianobacterias y algas**

El siguiente descubrimiento indica que en esta fachada ventilada de granito existe un riesgo de nacimiento de cianobacterias y algas, es decir, ya que desarrollan las condiciones térmicas y de humedad necesarias para su crecimiento. En relación a la humedad relativa, de las 4961 horas del año en las que se han obtenido temperaturas mayores de 74%, 3845 horas han sido mayores del 79%.

De hecho, las fotos de la fachada demuestran que, durante los 20 años que lleva el edificio construido, existe actualmente colonización de algas en los aplacados de granito. Concretamente en las partes donde el secado del aplacado es más difícil de producirse rápidamente. Esto es, en el centro del aplacado y no detrás de los montantes verticales, debido a los puentes térmicos ya recogidos en otra tesis doctoral de la línea de investigación seguida por el director de esta tesis. (Lopez, 2011)

En el caso de la humedad relativa superficial en el aplacado de granito, se observa como el contenido de agua es superior en la cara interior que en la cara exterior. Por tanto la superficie de la cara interior que da a la cámara de aire posee más contenido de agua. Ello puede ser observado en las figuras que se analizaron en el capítulo IV.

Los valores obtenidos y reflejados en el capítulo V reflejan gran cantidad de tiempo por encima que este material ha estado expuesto a estas condiciones, particularmente óptimas desde el punto de vista hídrico para el nacimiento y crecimiento de cianobacterias y algas. Esta hipótesis es corroborada también por Ramos et al (2013) donde se correlaciona la humedad relativa con el nacimiento de algas

Al ser la primera línea de defensa del exterior es de destacar dos comportamientos diarios diferenciado debido al *under-cooling effect* o efecto de refrescamiento. Este efecto hace que durante el día los valores de temperatura de la cámara estén por encima de la temperatura ambiental. No sucede lo mismo en el caso de la noche, donde la temperatura ambiental se expresa superior a la de la cámara. Esta temperatura inferior se correlaciona con riesgo de condensaciones en las superficies del aplacado de granito, por delante y por detrás, ya que se ha producido una liberación de energía que hace bajar la temperatura. De hecho realizados los cálculos de condensaciones por el procedimiento EN 13788 son cuatro meses de invierno donde existe el riesgo. En el caso del verano es durante el momento de refrescamiento.

Además de la lluvia como fuente de humedad y de agua líquida en el aplacado de granito, han existido condensaciones y por lo tanto, que ingrese agua líquida en las superficies del granito, tanto exterior como interiormente.

Es deducible que no sólo el clima es relevante para entender el comportamiento higrotérmico del cerramiento sino también las propiedades hídricas del elemento en la primera línea de defensa del exterior, en este caso el aplacado de granito. Este material tendrá una influencia significativa debido fundamentalmente a su capacidad de ingreso de agua y/o mojado, es decir, en la higroscopicidad, además de la permeabilidad. El granito es un material absorbente que tiene un grado de almacenamiento de humedad. Si la hoja exterior de la fachada ventilada tiene capacidad para almacenar agua, sería importante conocer al menos la rapidez de su secado. En este sentido (Karagiozis, 2002 en Simpson, 2010) concluyó que en la mayor parte de las regiones climáticas de EEUU beneficiaba bastante el uso de la ventilación tras el aplacado absorbente. Los materiales no absorbentes también pueden beneficiar pero menos que los absorbentes. No queda claro en este caso que un material absorbente como el granito le beneficie la ventilación de la cámara, porque si bien, al ser una fachada norte, el tiro térmico por diferencia de temperaturas es mínimo, existe tiro inducido por la humedad. Sin embargo no se ha estudiado el tiro inducido por humedad que podría estar sucediendo.

Si se analiza con detenimiento la comparativa de los resultados obtenidos de la simulación de las temperaturas superficiales exterior e interior del aplacado de granito, las diferencias obtenidas no son muy relevantes. Sin embargo, es la cara interior del aplacado en contacto con la cámara de aire la que posee una temperatura más elevada.

2. La humedad relativa en la cámara algunas veces es superior a la humedad relativa ambiental exterior, es decir, posee mayor contenido de agua

El siguiente hallazgo expone que la cámara de aire tiene un mayor contenido de agua (humedad absoluta) que el ambiente exterior. En este caso una posible explicación del fenómeno barajada supone que el aplacado de granito contribuye al aumento del contenido

de agua en la cámara, ya que es un material absorbente, que tarda en secar y que transmitirá el agua procedente de la lluvia y/o condensaciones superficiales.

Si se tiene en consideración la comparativa establecida entre las humedades relativas ambientales y de la cámara en la monitorización se observa que el contenido de humedad es, en todo caso, elevado. Los resultados indicaron que el contenido de humedad en los meses de invierno y de mayores precipitaciones es donde fue más elevado. Por el contrario es el mes de septiembre el que se advirtió con menor diferencia de humedades relativas entre el exterior y la cámara.

Los resultados de la humedad absoluta del ambiente y del exterior mostraron la existencia de una mayor cantidad de agua en la cámara que en el ambiente exterior. Esto también es reflejado en la simulación efectuada. La cantidad de g/m^3 existente en la cámara superior a la del ambiente.

Existen periodos donde esta diferencia es más relevante. Concretamente en el periodo de invierno se ha detectado que la humedad en la cámara es manifiestamente más elevada que en el exterior y además es en los momentos en los que llueve. Esto está también corroborado por los estudios de (Finch, Sc, Straube, & Ph, 2007) *que indican que la humedad en la cámara en invierno con lluvia es superior a la del exterior en una monitorización de rainscreen en Vancouver (Canadá)*, misma clasificación climática Koppen Geiger que A Coruña.

El estudio indicaba que los mecanismos primarios de humedecimiento y secado en las fachada ventiladas de madera son la difusión de vapor y la ventilación trasera, ello combinado con el humedecimiento ocasional de las filtraciones de agua.

También se han comparado los resultados obtenidos de la temperatura ambiental y de la cámara en la monitorización y en la simulación. En el caso de la temperatura se observa la misma tendencia de los valores monitorizados se correlacionan en gran medida con los valores simulados. Véase capítulo VI de comparación.

Se resume este hallazgo avanzando recomendaciones en el sentido que la utilización de materiales absorbentes en la primera línea de defensa de la fachada ventilada es de suma importancia controlar el proceso y tiempo de secado. Ello además es de relevancia conocer la cantidad de humedad relativa y lluvia que tiene el ambiente.

3. Las condiciones climáticas influyen en el comportamiento higrotérmico del cerramiento de la fachada ventilada

Los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas durante el capítulo V han mostrado claramente que la utilización de un mismo tipo de cerramiento como de la fachada ventilada de granito, con las mismas propiedades de materiales pero en distintas localizaciones en España y con clasificaciones climáticas diferentes expusieron comportamientos diferenciados.

En concreto, el valor de la transmitancia recogido en los resultados de monitorización ha sido más alto en las localizaciones con mayor contenido de precipitaciones y humedad relativa ambiental. Las localizaciones de A Coruña y Madrid son las que tuvieron el peor y mejor comportamiento en los valores de transmitancia térmica. Los meses de diciembre y enero han

registrado unos valores de transmitancia térmica mensuales con una diferencia de más del 10%.

En esta línea Pérez Bella (2012) expone la importancia de las precipitaciones, en concreto la lluvia dirigida por el viento para proponer unos factores de corrección más desfavorables a las conductividades térmicas de los materiales.

VII.1.2 PROCESOS DE SECADO Y MOJADO EN EL CERRAMIENTO

1. El tiempo de secado es largo

El descubrimiento más relevante para este cerramiento es que ha mostrado una lentitud para su secado y de equilibrio hídrico con el entorno de 20 años. Realizando los análisis de sensibilidad de las propiedades de los materiales y en concreto del hormigón, se ha descubierto que variando las propiedades características del hormigón, éste reduciría el tiempo de equilibrio hídrico. Además se han realizado simulaciones con otros materiales soportes con el ladrillo, obteniendo procesos de secado y equilibrio hídrico de 3 años, algo muy razonable y en la línea de otros estudios. Pueden verse los estudios realizados en el capítulo V de análisis numérico de simulación.

En esta línea de los resultados obtenidos se encuentra Browne (2012) *donde la simulación emprendida como parte de este estudio de caso sugiere que las paredes pueden tardar hasta 20 años para establecer un nuevo equilibrio de la humedad, aunque la mayoría de los casos investigados en este estudio tomaron entre 5 y 10 años.*

Las figuras de los resultados del capítulo V muestran cómo se va reduciendo el contenido total de agua, resultado obtenido de la simulación de la fachada ventilada con hormigón armado. La asíntota de la curva aún no es horizontal, porque la tendencia es reducir más el contenido de agua, indicando que aún no se ha alcanzado el equilibrio.

Con los análisis de sensibilidad se extrajo que la utilización de ciertos tipos de hormigón puede hacer variar la duración del secado del cerramiento. Con el tipo de hormigón elegido en la caracterización, el tiempo de secado ha sido de 15 años. Contrariamente este tiempo se ha reducido cuando se ha elegido otro tipo de hormigón. La diferencia principal radica en el valor del factor de resistencia a la difusión de vapor, el cual se ha reducido considerablemente. Esto quiere decir que mejorando la permeabilidad del hormigón, se puede reducir considerablemente el tiempo de equilibrio hídrico.

Gete-Alonso de Ylera (1977) expone que la **permeabilidad y la higroscopicidad** son incompatibles. La permeabilidad es mayor o menor según sea el diámetro de los capilares; la higroscopicidad aumenta al disminuir el diámetro de los poros. La presión capilar o higroscopicidad aumenta con la inversa del diámetro de los capilares. La permeabilidad tiene más importancia que la higroscopicidad, los hormigones se alteran más por defecto de impermeabilidad que por capilaridad excesiva. Higroscopicidad pequeña con capilares grandes y permeabilidad baja con capilares pequeños.

En los poros del hormigón se llegan a condensaciones con grados higrotérmicos inferiores a 100%, y tantos más bajos cuanto más finos son los poros. Con poros de 3μ , la condensación

llega con el grado higrotérmico de 70%, como normalmente un 30% de los poros del hormigón son inferiores a esta dimensión, se saturarán de agua a un grado higrométrico del 70%. El hormigón impermeable tiene una baja relación A/C. El uso de plastificantes y/o aireantes producen hormigones más impermeables.

En el caso de ambientes con altas humedades relativas como es este caso de A Coruña, permitir la difusión del vapor de agua es importante. Debido también a las temperaturas templadas, la cantidad de vapor de agua en el ambiente es muy elevada, ya que la capacidad para contener agua el ambiente aumenta con su temperatura. El resultado obtenido de la alta duración del tiempo de secado permite reflexionar sobre la importancia que tiene la difusión de vapor de agua. En este sentido y con estas condiciones, se puede deducir que *la difusión del vapor de agua es una carga de humedad crítica comparable a la lluvia y en particular al WDR*, afirmación ya realizada por Tariku (2015)

En el caso de variar el tipo de soporte, en la figura siguiente se ha representado la simulación con ladrillo en vez de hormigón. Se observa la tendencia a la horizontalidad de la curva a partir del tercer año, significando que ya ha alcanzado el equilibrio hídrico.

Se extrae la importancia del elegir adecuadamente el material de soporte del cerramiento en este tipo de fachada ventilada para el equilibrio hídrico. La propiedad de la permeabilidad al vapor de agua es significativa para la reducción de su contenido total de agua más rápido.

En el caso del hormigón con el factor de resistencia a la difusión de vapor de agua más elevada, se analiza la tendencia de la curva en 20 y 30 años. Se observa cómo se convierte a lo largo del tiempo en horizontal, es decir, cuando se ha alcanzado el equilibrio hídrico.

En definitiva un cerramiento con una hoja interior con alta resistencia al paso del vapor de agua conseguirá aumentar el tiempo de secado del cerramiento. Contrariamente si se dispone un material con baja resistencia al paso del vapor de agua se conseguirá rebajar el tiempo de secado y equilibrado. Es, en este caso, relevante destacar que la elección de los materiales mejora o empeora el comportamiento desde el punto de vista hídrico. Argumento también sostenido por Aparicio Fernández et al (2014)

2. La cámara ventilada no influye en el secado del cerramiento. No hay tiempo suficiente para el secado.

A la pregunta sobre la contribución de la cámara ventilada en el mejor comportamiento higrotérmico, que se recogió en el capítulo II, los diferentes investigadores no se ponen de acuerdo sobre su contribución. La mayoría de ellos afirman que la cámara de aire contribuye al secado del cerramiento y como consecuencia a su mejor comportamiento. Este es el caso de investigadores como Nore (2009) en el que desarrolla un discurso sobre los efectos de la cavidad como positivo, negativo y sin efecto, concluyendo después de sus monitorizaciones y simulaciones realizadas en Trondheim, Noruega si contribuye. Caso similar sucede con los investigadores Künzle y Karagiozis (2008) donde también tras un discurso argumentado se concluye que en general es positivo tras monitorizaciones y simulaciones realizadas en Washington, Estados Unidos.

De la revisión realizada, es importante primero separar el posible comportamiento de una cámara de aire sometida a una radiación solar directa. En este caso los diferentes estudios realizados concluyen que la fuerza principal de movimiento y ascenso del aire es la diferencia de temperatura. Además esta radiación solar proporciona la energía necesaria para el secado del cerramiento por evaporación. Sin embargo, en este trabajo se ha intentado no considerar que la fachada ventilada esté bajo los efectos de la radiación solar directa, por lo que el estudio se ha realizado en la orientación Norte. Como segunda fuerza principal en el movimiento del aire en la cámara puede ser considerado el flujo inducido por la diferencia de contenido de vapor de agua en el ambiente. Se considera que, sin grandes ráfagas de viento, y bajo el viento en calma, este podría ser la forma del movimiento del aire en la cámara.

No hay consenso en indicar si el hecho que se haya introducido el aire húmedo en la cámara puede hacer funcionar peor el cerramiento y que la ventilación que se pueda producir no sea eficaz por el alto contenido de vapor de agua. En este caso, es de aclarar también el clima de clasificación Köppen Geiger Csb de A Coruña donde se ha analizado con precipitaciones y humedades relativas altas anuales, es decir, con una carga hídrica elevada.

En esta línea, el estudio realizado en Bilbao por Enedi (2013) concluye que para la zona climática de País Vasco, y en invierno, es mejor considerar la cavidad cerrada ya que las ventajas obtenidas por una fachada ligera ventilada en verano son menores que las ventajas obtenidas en invierno con una opción estanca desde el punto de vista de un comportamiento energético. Argumento similar es sostenido por (San Juan et al, 2012) donde para una fachada ventilada de juntas abiertas orientada al norte, en invierno, otoño y primavera, se comporta un poco peor sin radiación solar que la cámara estanca. Hay un incremento del consumo de energía de un 4 a 5%.

De los resultados de la monitorización *in situ* de la fachada ventilada de granito de mayo 2008 a abril 2009, se puede decir que el aire de la cámara posee ligeramente más humedad absoluta que el aire del exterior, expuesto ya en el apartado anterior.

Que estudiados los movimientos del flujo de vapor de agua por diferencia de presiones entre el exterior y la cámara, se ha descubierto que el flujo de vapor no se dirige totalmente hacia el exterior sino que lo hace también hacia el interior (Ver figura IV.43).

La figura revela que han sucedido dos condiciones en la fachada ventilada: situaciones en las que $P_{v\ cam} > P_{v\ ext}$ cuando el aire exterior está más seco, se mezcla con el de la cámara y remueve la humedad de la cámara. La situación inversa, donde $P_{v\ cam} < P_{v\ ext}$ el aire húmedo trae esta humedad desde el exterior a la cámara y puede causar el mojado de las superficies inmediatas a la cámara, aislamiento y cara interior del granito.

Las figuras representadas en el capítulo IV han indicado que cuando $P_{v\ cam} > P_{v\ ext}$ el resultado tiene un valor negativo, significando que el cerramiento tiene un potencial para secarse, porque el flujo de vapor se dirige hacia el exterior. Contrariamente, si $P_{v\ cam} < P_{v\ ext}$ el valor es positivo, significando que el flujo de vapor se dirige hacia el interior con potencial de mojado del interior del cerramiento.

Tras el análisis, y estudio horario anual realizado, los resultados mostrados indican que las horas para el potencial secado anual son ligeramente mayores, siendo aproximadamente un 55% del total. En concreto el balance en los meses de otoño e invierno tienen 2621h de movimiento de flujo de vapor para la salida, significando un 60% del total de horas, frente a los 1747h para su ingreso en la cámara. En el caso de los meses de primavera y verano, de los datos registrados y faltando 747h por monitorizarse, se han recogido 1805h de movimiento del flujo hacia el exterior del cerramiento frente a las 1816h de movimiento hacia la cámara, significando un 50% sobre el total.

Se concluye que en el ambiente analizado, existe anualmente un 5% más de flujo de salida de la cámara que hacia el interior. Esta tendencia, en otoño, invierno es de un 10% mayor el del flujo de salida y en primavera, verano no existe diferencia.

La monitorización del periodo del 19 al 17 de marzo del 2016 mostró, sin embargo, una clara tendencia de difusión de flujo de vapor hacia el exterior. El hecho de utilizar la calefacción y elevar la temperatura interior para la realización del ensayo del valor U produjo que la presión de vapor más alta tuviese lugar en el interior y que la difusión de vapor fuese claramente hacia el exterior, con un movimiento de vapor de la cámara hacia el exterior en el 75% de todas las horas.

No se puede concluir sin embargo nada acerca de las condiciones de ventilación que existieron en la cámara de aire pues éste no fue el objetivo del estudio. Aunque y tal y como se dijo en el capítulo II, diversos estudios como Falk et al (2013) y (2014) exponen la importancia del diseño de la cavidad para el ratio de ventilación de secado al ser de gran importancia

3. La elección correcta de las propiedades y disposición de los materiales componentes, concretamente μ y A son determinantes para su influir en el comportamiento higrotérmico

Los estudios realizados de simulación de análisis de sensibilidad concluyeron que la elección de algunas propiedades de los materiales que componen la fachada son determinantes en su mejor comportamiento. En concreto, el factor de resistencia al vapor de agua, la posición constructiva del aislamiento y las propiedades de absorción y almacenamiento del aplacado exterior son significativas.

Acorde a los resultados obtenidos en este estudio, Pisello et al, (2014) indica que existe una correlación entre la menor transpirabilidad del cerramiento (μ) y más altas humedades relativas con mayores transmitancias térmicas. Esta afirmación ha sido corroborada en esta investigación.

En concreto, el hecho de tener como componente del cerramiento el poliuretano, se ha observado altas variaciones en el contenido de humedad de este material. Situación similar a la obtenida por Finch et al (2007) *donde la espuma de poliuretano en Ontario se detectó una diferencia de contenido de humedad de más del 30%*

Si se extrae el último año de simulación, se observa que las curvas son similares pero con mayor amplitud, siendo las de mayor amplitud, es decir más valor de contenido de agua, las que poseen mayor espesor de aislamiento. Es en el caso del cerramiento sin aislamiento, el

contenido de agua de la cámara de aire que es el menor, tal y cómo se mostró en el capítulo V de análisis numérico de simulación.

Se ha hallado que el cerramiento con el espesor de 30cm de aislamiento de poliuretano en la fachada ventilada es el que produce un contenido de agua en la cámara de aire mayor que en el resto de simulaciones realizadas.

En este mismo sentido Desmarais (2008) cuando el aislamiento (en este estudio se hizo con poliestireno extrusionado) se añade al cerramiento por el lado caliente, el incremento de contenido de agua no fue más del 25%. Las medidas del contenido de agua en el caso de añadir el aislamiento en la cara fría aumentaron a un 70%. Sin embargo cuando se da el valor de transmitancia térmica, valor U, este valor es el mismo pero su comportamiento higrotérmico, de contenido de humedad es diferente. Por lo tanto, el autor argumentaba que el parámetro de la transmitancia térmica no puede ser representativo del comportamiento higrotérmico.

También Lepage et al (2013) hicieron investigaciones al respecto y concluían que incrementando la cantidad de aislamiento, se incrementa el riesgo de problemas de humedad en casi todas las zonas climáticas. La disminución de la permeabilidad al vapor del aislamiento y la disminución de los flujos de calor se combinan para exacerbar las susceptibilidades de humedad inherentes en el sistema. Sin embargo, la colocación del aislamiento es más importante que la cantidad de aislamiento. El aislamiento por la cara exterior es la mejor aproximación para aislar edificios en climas fríos. El aspecto más importante aprendido de las simulaciones es que las capacidades de secado de los muros son altamente dependientes de las condiciones ambientales.

Otro de los hallazgos mostrados es que la elección de las propiedades del hormigón armado ha sido muy variable y se han encontrado unos contenidos totales de agua en el cerramiento muy diferenciados. Este argumento es sostenido por el apartado anterior de esta discusión.

Se concluye que la adecuada elección de ciertas propiedades de los materiales de construcción empleados, en concreto la permeabilidad al vapor de agua y el coeficiente de absorción es de gran relevancia ya que se relacionan con la velocidad de secado del muro y como consecuencia para una retención y menor contenido de agua.

VII.1.3 DENSIDAD DE TASA DE FLUJO DE CALOR Y TRANSMITANCIA TÉRMICA

1. **Se puede definir patrones de comportamiento de densidad de tasa de flujo de calor interior como característico del tipo de cerramiento analizado, de la estación climática y su orientación.**

En los ensayos de monitorización y de análisis numéricos de simulación realizados, se obtuvieron patrones de comportamientos diarios (otoño-invierno-orientación noreste) de la densidad de tasa de flujo de calor del interior con respecto a la temperatura exterior según el cerramiento analizado.

Se analizaron cerramientos de cara-vista de doble hoja con aislamiento de XPS, de pastas de granito, de vidrio doble y simple y finalmente la fachada ventilada de granito.

En el caso de los cerramientos de termoarcilla, de pastas de granito y de la fachada ventilada la densidad de tasa de flujo de calor interior refleja un comportamiento en contrafase con la temperatura exterior, es decir, cuando se alcanzan los mayores valores de temperatura exterior, se alcanzan también los valores más bajos de densidad de tasa de flujo de calor interior.

En el caso del comportamiento del vidrio, éste es inverso al cerramiento. El valor máximo de temperatura exterior se corresponde con el valor mas alto de pérdida de densidad de flujo de calor. La gráfica de la temperatura exterior y la densidad de tasa de flujo de calor se mueven en fase.

Este hallazgo de los patrones de los cerramiento se corrobora por los estudios realizados por Balocco (2002), Sugo et al (2005), Suarez et al (2012) y Marinosci (2011) ya explicados en el capítulo II. Recaltar que la fachada ventilada de granito se comporta como un cerramiento.

Se compararon los resultados de densidad de tasa de flujo de calor obtenidos de la monitorización y de la simulación interior y exterior. Se consiguió una buena correspondencia en la predicción del comportamiento del cerramiento por el software de análisis numérico. En concreto, el coeficiente de determinación deducido de la comparativa en el caso de la densidad de tasa de flujo de calor interior fue de $R^2=0,74$ y del exterior $R^2=0,78$.

Otros investigadores como Giancola, et al (2012) realizando una comparativa entre lo monitorizado y lo simulado han indicado también una buena correspondencia.

2. La humedad relativa influye sobre el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor recogida en el interior

Las monitorizaciones realizadas, así como las simulaciones, recogieron los valores de la posición tanto interior como de la posición exterior. En el caso de la posición interior, Rogas et al (2000) explica y relaciona la posición y tamaño de los sensores para el tipo de densidad de tasa de flujo de calor que recoge y especifica que el sensor puesto por el interior no sólo mide el calor por conducción sino también el calor latente debido a la humedad y cambios de estado.

Lo cierto es que la simplificación, en primer lugar, de considerar la pérdida de energía de conducción de calor (Ley de Fourier) es el primer problema. La pérdida de energía también se puede generar por la existencia de agua y/o vapor de agua en la envolvente. Los cálculos se realizan con los materiales en seco. Los valores de conductividad térmica característicos son diferentes cuando existe una humedad relativa elevada en el ambiente en el que se coloca y/o cuando están mojados, aumentando en proporción con la mayor cantidad de agua y/o vapor de agua en su contenido.

Asimismo, los cambios de estado de líquido a vapor y viceversa no se rigen a la ley de Fourier por lo que no son tenidos en cuenta para estos cálculos. Si bien existen ambientes y climas muy secos, hay climas con humedades relativas altas, en las que los cambios de estado tienen lugar. En este sentido Treschel (1994) explica con detalle los comportamientos relevantes de un cerramiento atendiendo a estos parámetros. Ver capítulo II.

Por tanto se deberá considerar la energía que se pierde, no sólo por conducción sino también por la transferencia de masa, agua y/o vapor de agua en los materiales y/o cambios de estado. Esta simplificación ha dado lugar a que no se tenga en cuenta esa energía perdida que las legislaciones no están teniendo en cuenta. La valoración de la pérdida de energía y del flujo de calor se advierte como más precisa y útil para estos climas. El sometimiento de la envolvente a la humedad relativa elevada en los procesos de simulación evalúa esa pérdida.

Esta investigación viene en la línea lo que (Tariku, Simpson, & Iffa, 2015) expuso en su estudio. En él sugería que para este tipo de climas, la difusión por vapor de agua es una carga de humedad crítica comparable al efecto que induce la lluvia dirigida por el viento. A esta afirmación se le añadiría la difusión de vapor de agua relacionada siempre con los cambios de fase del agua. En este mismo sentido y en su momento Künzle (1995) indicaba que el flujo de difusión de vapor conectado con los cambios de fase, como en los procesos de secado, pueden ser de gran importancia en términos de balance de calor.

Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran esta afirmación. La energía vinculada a los cambios de fase es importante en meses donde se producen las humedades relativas más elevadas, así como la mayor cantidad de precipitaciones. Realizadas las regresiones, la ecuación de regresión obtenía como segundo parámetro independiente la humedad relativa, es decir, que este parámetro podía explicar una parte del comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor. La proporción era variable según la prueba de verificación analizada pero a partir de un 67%, algo no desdeñable. Por el contrario, realizando la regresión de los valores obtenidos de la densidad de tasa de flujo de calor exterior, el parámetro de la diferencia entre la temperatura exterior e interior obtuvo explicaciones de su comportamiento en aproximadamente un 46% a través de la ecuación de regresión.

Llegados a este punto, y para este tipo de climas, se hace necesaria una reflexión sobre la necesidad del parámetro de transmitancia térmica valor-U. Éste es usado para una evaluación energética de la edificación. Como se indicó anteriormente para la obtención mediante cálculo de la transmitancia térmica, se utiliza la conductividad térmica vinculada a la conducción del calor. Sin embargo, las mediciones recogidas del flujo de calor en los cerramientos hacen referencia al flujo de calor total y en este caso, también la medición recoge un valor, no sólo de conducción sino también latente, debido a los cambios de fase.

En definitiva, en este clima se está realizando un balance de calor relativo al aspecto hídrico y sus cambios de fase. Se puede afirmar que para este tipo de climas, este parámetro de la transmitancia térmica no es representativo si se quiere proceder a los cálculos de demandas energéticas, ya que existe otro flujo que no está siendo considerado. Esto es importante, sobre todo, en un momento en el que la legislación ha restringido los valores de transmitancia a límites muy bajos.

Los resultados de la simulación indicados en la figura V.48 relacionan la hipótesis de Rogas et al (2000) donde se pone en comparación la diferencia de densidad de tasa de flujo de calor entre el interior y el exterior (indicado como calor latente) con el flujo de masa de humedad anual. Se observa que se correlacionan los dos comportamientos.

Se resume el hallazgo que para explicar el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor interior, se ha encontrado que el parámetro de la humedad puede explicar este comportamiento.

3. Los distintos valores de transmitancia térmica difieren

El valor U de transmitancia térmica es un dato orientativo de la pérdida de energía por área de superficie y por cada grado de temperatura. Este dato es manejado en el diseño de la envolvente de las edificaciones y exigido en las legislaciones estatales actuales para el cálculo de la demanda energética.

Se realizó una comparación entre la transmitancia térmica U recogida de los valores in-situ y el cálculo numérico efectuado. El valor monitorizado $U=0,73\text{W/m}^2\text{K}$ (recogido de los valores climáticos in-situ), fue muy similar al obtenido por simulación en el mes de febrero utilizando valores climáticos normales. Sin embargo, la diferencia en relación al cálculo tanto de U_{seco} como de U_{80} , osciló entre un 4% y hasta un 16,8%. En todo caso, estos valores se han desviado en más del 15% del valor de transmitancia térmica calculada según CTE y la obtenida en la simulación.

El hecho de utilizar unos valores más parecidos a los obtenidos en la monitorización, supone considerar un incremento de las pérdidas de energía del cerramiento de fachada ventilada de granito de un 15,6% con respecto a los valores de cálculo, es decir, pasar de $21,2\text{ kWhm}^2/\text{año}$ a $24,5\text{ kWhm}^2/\text{año}$.

Sin embargo, los valores recogidos de la monitorización mostraron diferencias aún más grandes. El valor recogido fue de $1,30\text{ W/m}^2\text{K}$, del sensor 3. La transmitancia por el método de TBM recogió un valor de $U=1,05\text{ W/m}^2\text{K}$. Aunque estos dos valores fueron mucho más altos, estos valores fueron rechazados ya que se dedujeron diversos errores a lo largo de la recogida de los datos.

Resta pensar cual ha sido la causa de la desviación del 16,7%. A continuación se exponen argumentos que pueden justificar en algún grado esta diferencia.

Causa posible: La sensibilidad de la instrumentación y su procedimiento

Una posible causa podría ser que las diferencias pudieran estar relacionadas con la precisión de los instrumentos que se realizaron y de los errores cometidos por las habilidades profesionales requeridas en este tipo de trabajos, por lo que se concluye que es especialmente farragoso o complicado la utilización del método de la ISO 9869:2014 por el método de la media hay que estar en constante búsqueda de las multitud de condiciones a cumplir para satisfacer las exigencias normativas.

Causa posible: Puentes térmicos de la subestructura de aluminio

Es un hecho que en la fachada ventilada se realizaron termografías que mostraron que la subestructura estaba cediendo calor del interior en invierno, por lo tanto constatándose como puentes térmicos. Como se abordaba en el capítulo II Tanner et al (1998) ya realizaron unos estudios para cuantificar cuanto se perdía por una subestructura de aluminio similar a la

ensayada. El valor de transmitancia térmica para esa proporción, supuso un 48% de incremento en el valor de la transmitancia térmica, pasando de un $0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$ a $0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$

Se podría suponer que aproximadamente un incremento de un 48% podría ser debido a los puentes térmicos de la subestructura. Si bien es cierto que, para su evaluación, ello requeriría un estudio exhaustivo que no es motivo de este trabajo.

Causa posible: Identificación adecuada de materiales

La siguiente hipótesis considera que no se han utilizado en el cálculo los verdaderos valores de conductividad térmica. Para dar respuesta a esta pregunta, se realizaron análisis de sensibilidad con el software de simulación Wufi Pro 5.3 (ver capítulo V) de la conductividad térmica del aislamiento de poliuretano y mostraron diferencia de valores

Los hallazgos mostraron que los valores de cálculo para este cerramiento pueden variar al no tener la identificación de las propiedades térmicas exactas del poliuretano que se dispuso.

Causa posible: Deterioro y envejecimiento del material

Otra hipótesis de posible causa para el incremento del valor de la transmitancia térmica puede ser el deterioro y envejecimiento. En particular, el material que más contribuye sobre ese valor es el aislamiento térmico de poliuretano.

En esta hipótesis se supondría que el aislamiento de poliuretano no estaría funcionando, al estar deteriorado por el alto contenido de humedad, los 20 años en funcionamiento y no poseer ningún tipo de protección. La tabla siguiente recoge los valores obtenidos por cálculo del cerramiento de fachada ventilada no considerando el aislamiento. Los valores obtenidos son bastante elevados, en correlación con los valores obtenidos en la monitorización. $U_{\text{seco}}=1,696 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{80\%}=1,814 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{\text{mensual febrero}}=2,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $U_{\text{mensual marzo}}=1,95 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Sin embargo, la hipótesis que no esté funcionando el aislamiento es excesiva, ya que es un hecho que existen puentes térmicos y una contribución de humedad en el valor. Sin embargo, no se descarta que estuviese funcionando es una situación intermedia, es decir, que ha mermado parcialmente sus propiedades de conductividad térmica.

No se ha considerado motivo de este estudio la cuantificación de la merma que haya podido tener el aislamiento térmico de poliuretano durante los 20 años funcionado en esta fachada ventilada.

Causa posible: Humedad

La norma ISO 9869:2014, en su apartado 7.3 de comparación de los valores calculados y medidos, indica que si existen diferencias de más del 20% de transmitancia térmica entre el valor calculado y el valor medido pueden ser debidas entre otras causas enumeradas a los *efectos de la humedad y a los cambios de fase tales como congelación, descongelación, condensación o evaporación del agua o humedad*. Finalmente acompaña un párrafo final de: ***“todas estas fuentes de error se tendrán en cuenta en la interpretación de la comparación de los resultados dados por el cálculo y medición.”***

Los cálculos del análisis numérico de simulación dinámica mostraron que las condiciones ambientales han elevado de $0,65\text{W/m}^2\text{K}$ a $0,73\text{ W/m}^2\text{K}$, lo que supone un incremento de un 15% de este valor, que sumados al 4% de incremento de la conductividad en estado húmedo sobre la seca, Los valores del cálculo ya indican que existe aproximadamente un 19% de incremento sobre la transmitancia térmica en estado seco debido a la humedad y las condiciones ambientales.

La norma considera esta diferencia de error entre lo medido y lo monitorizado. Sin embargo, en este clima, y con estos resultados no se puede obtener el flujo de calor total que verdaderamente está sucediendo y que, en definitiva, marca el consumo real del edificio. El error es lo más importante en este clima. Entonces la norma me está diciendo que no puedo obtener el valor de transmitancia térmica. Es, por tanto, que la validez de este parámetro para situaciones climáticas como la expuesta, sea nula por no ajustarse a la realidad. Y sin embargo, este resultado es de gran relevancia.

Situaciones climáticas opuestas en España, con calor y baja humedad relativa y precipitaciones correlacionan con resultados muy buenos. Son los estudios realizados en climas cálidos y más secos del mediterráneo, con orientaciones del cerramiento diferentes a la Norte. Los valores de cálculo no difieren de lo recogido en las monitorizaciones.

En el caso de (Giancola et al, 2012) el estudio realizado para una fachada ventilada cerámica de juntas abiertas en Almería (España), el modelo energético propuesto puede predecir temperaturas y flujos de calor (para el cálculo de U) con desviaciones más bajas del 10%.

Otros autores como Marinosci et al (2011) indica que encontró una buena coincidencia cuando el viento estaba en calma, y se encontraron grandes desviaciones entre los valores experimentales y numéricos cuando había condiciones venteadas.

Sin embargo, si se recogen los estudios realizados en situaciones ambientales más similares a las estudiadas como Gran Bretaña (Cfb) difieren mucho más. Baker (2013) indica en sus estudios *“Variaciones de U de más del 50% en las monitorizaciones realizadas”*.

Se ha mostrado que una posible explicación del empeoramiento de la transmitancia térmica es la humedad, al mostrarse ya en los resultados recogidos del análisis numérico de simulación su correlación. No obstante, no ha sido posible determinar si toda esa diferencia obtenida entre el valor medido y el calculado puede ser explicada por la humedad.

Siguiendo este argumento, el parámetro de la transmitancia térmica o también llamada la inversa del valor U resistencia térmica, la siguiente pregunta para ser planteada es si podría ser este parámetro adecuado y que se ajustase a los estados reales de comportamiento higratérmico del cerramiento.

En la definición de la resistencia térmica, ésta depende de λ , de la conductividad térmica y de la diferencia de temperaturas. Sin embargo a la hora de implementar el cerramiento no hay un lugar para los parámetros reales de calor específico, masa, calor latente, no están incluidos en ese valor de la resistencia térmica.

¿Qué es lo que pasa si queremos hacer la medida de ese valor in situ? Se encuentra que los elementos de medición del flujo de calor son función de la temperatura según la Ley de Fourier, dan una señal proporcional a la diferencia de temperaturas. Se plantea el primer problema, la diferencia de temperaturas del cerramiento se van a originar otros procesos sobre el cerramiento real, es decir, sobre la masa, sobre el vapor de agua, inercia, que no se ha tenido en cuenta en la propia fórmula de la resistencia. Por lo tanto la obtención del valor que la definición usa como U está severamente afectada porque no hubo elementos en el cálculo previo en los que se le incluyeran esos elementos que estamos explicando.

Se podría establecer un símil eléctrico con la resistencia eléctrica, impedancia y de conductancia y admitancia. La resistencia eléctrica no es una función del voltaje, es una función de la naturaleza del material e intrínseca y dependiendo del material. Si se hace un análisis estacionario eléctrico y con voltaje constante podemos ir utilizando la Ley de Ohm a nivel elemental $I=V/R$, por lo tanto $R=V/I$ pero la paradoja, hay que prestarle atención en esa fórmula, no se puede decir que R es función de V . De forma análoga que la capacidad de un vaso no depende de la altura que tenga el líquido que tenga dentro sino de las dimensiones del vaso.

Las cosas se complican un poco más cuando se profundiza un poco más sobre el concepto de R . Nos encontramos a nivel físico que R es una de los componentes pero no el único que ofrece dificultad al paso de la corriente eléctrica, ya que hay otras características inherentes que hay que tenerlas en cuenta como la reactancia que es una función compleja, vector ($j \cdot x$) que está en cuadratura con R (90°) de tal forma que la suma compleja de estos dos vectores da uno que es la impedancia eléctrica que esta sí contiene las dos características. Por lo tanto la impedancia eléctrica se tiene que definir de un módulo con un ángulo en el espacio y la admitancia es la inversa de $Y=1/Z$ (Impedancia) que refleja mejor la intensidad de corriente que atraviesa esa impedancia, de la misma forma análoga que el calor que atraviesa la pared sería también una función compleja que debiera ir añadido de un módulo y un ángulo. En conclusión estas dos magnitudes hay que diferenciarlas porque hay dificultades de sacar conclusiones ya que como se dijo anteriormente en el mundo real nos encontramos con masa térmica y peso. Esto podría explicar que la norma tenga tantas coletillas, excepciones de correcciones para el cálculo del valor de U .

Es una forma de explicar los conceptos. Para explicar una dirección de densidad de tasa de flujo de calor es necesario considerar como mínimo dos direcciones de resistencia que son explicadas en la matemática por la parte real y la imaginaria

Si se analizan algunos datos de publicaciones, un simple análisis estadístico de datos para obtención de valor U in situ correctas, encontramos que haciendo regresión y tomando variables dependientes el flujo de calor q y variable independiente ΔT se encuentra que el coeficiente de regresión entre ambas es ínfimo del 2%. La pregunta siguiente es que quiere decir esto. Quiere decir que, en la medida de la obtención del valor U se aproxima al valor teórico cuando la influencia de las diferencias de temperatura en el análisis de datos tenga un bajo coeficiente de regresión entre las dos variables.

Por otro lado se ha detectado que haciendo regresión, tomando como variables independientes ΔT y H_r tanto exterior como interior, se encuentra un mayor coeficiente de

regresión debido a las humedades. Esto hace sospechar que los cerramientos, debido a la constitución real de los mismos, las inercias y la higroscopicidad de los materiales pudieran ser relevantes en estos procesos térmicos. De acuerdo con nuestra hipótesis que el estudio del que versa esta tesis sobre calor y humedad estudio higrotérmico se hace muy necesario para poder explicar los comportamientos de los cerramientos higroscópicos que sean porosos.

Por otro lado, también es necesario añadir que en las pruebas de verificación realizadas de cerramientos no porosos, contrariamente el comportamiento cambia drásticamente y pasa a tener la regresión un alto coeficiente entre el flujo de calor q y la ΔT .

En consonancia con este argumento por ejemplo la normativa canadiense desde el 2013 amplía, completa y perfecciona con el parámetro denominado resistencia térmica efectiva, que en resumen toma en consideración una corrección del valor de resistencia térmica por la inercia del cerramiento.

Si seguimos la normativa para la medición del valor de U bajo el clima al que afecta el estudio de esta tesis se encuentran unas dificultades en principio no previstas. Que son las bajas diferencias de temperaturas T_i y T_e y las altas humedades relativas en una construcción en general inercial o de gran masa que la norma la considera como adenda o añadido. Es también curioso que nuestras regresiones curiosamente pasan por alto las condiciones hídricas, que nuevamente la norma la vuelve a incorporar como adenda.

En conclusión para la aplicación en estas condiciones excepcionales de la norma se vuelven en este clima las condiciones normales de aplicación. Resumiendo en este clima las excepciones o las correcciones son lo normal. Las desviaciones a indicadas por la norma serían necesarias, deberían ser invertidas a condiciones normales.

Esta reflexión anterior nos lleva a realizar la última pregunta sobre si el parámetro de la transmitancia térmica, valor U sería es el más adecuado para utilizar en los cálculos de consumo de energía de los edificios, en climas con altas humedades relativas.

Lo cierto es que si para calcular la transmitancia térmica, valor U , sólo se trata de medir el calor por conducción de los materiales, no se está teniendo en consideración toda la energía requerida para realizar cambios de estado de agua a vapor y viceversa en este tipo de clima tan húmedo y con altas precipitaciones. Se producirán condensaciones y evaporaciones, y como consecuencia un robo de energía necesaria para convertir el agua en vapor pero también una liberación de energía en forma de calor para condensar el vapor de agua. Además estas circunstancias suceden cuando las temperaturas bajan. En el caso del verano, las temperaturas se elevan y la humedad relativa y precipitaciones también se reducen. Como consecuencia, este parámetro no es tan necesario en estos meses para el cálculo de energía. El consumo en verano es mínimo.

La respuesta a la pregunta parece a priori evidente. Si bien la humedad influye en la conducción de los materiales incrementándola, debido al ingreso de agua y/o vapor de agua en el propio material. En este caso la norma contempla este caso haciendo correcciones de conductividad térmica en los materiales. Sin embargo, lo que aquí se discute es la energía

vinculada a los cambios de estado y este parámetro no tiene en consideración para este clima estas circunstancias.

Por tanto, la obtención de este valor de U, a éste parecer no juega un valor tan importante como el que parece que por fuera se valora, ya que no explican a estos complejos efectos higrotérmicos por lo que se piensa que el análisis del cerramiento que se está estudiando da más luz otro tipo de enfoque en el que tenga en consideración peso, masa, humedad que es lo que se concluye a juzgar y dado el análisis de los datos de los diversas monitorizaciones como se puede observar y se han nombrado en esta discusión.

Es observable con los datos obtenidos que las diferencias de temperatura así como las diferencias de la amplitud o de la amplitud de los valores de densidad de tasa de flujo de calor influyen mucho, ponderan, tienen gran influencia en los resultados del cociente $q/\Delta T$, ya que pequeñas diferencias de temperatura o humedad pueden repercutir enormemente en el valor de U.

Es de señalar también que en los cálculos del valor de U en el cerramiento cerámico y de granito y del vidrio analizados en las pruebas de verificación del capítulo VI se hace más asequible obtener resultados coherentes y de acorde y más aproximados con los cálculos teóricos.

Estas condiciones nos hacen reflexionar sobre si se debería desarrollar un procedimiento para poder deducir el flujo de calor latente, de aspecto hídrico con respecto al flujo de calor por conducción de aspecto térmico o de diferencias de temperaturas. Se trata de un posible parámetro que evaluase el calor latente y su relación con respecto al calor por conducción. Cuál es su comportamiento y su tendencia. Saber, en definitiva, que gasto de energía podría existir de la situación climática a la que está sometida este cerramiento y si éste tipo de cerramiento es el más adecuado para reducir este gasto.

Los resultados obtenidos y la dificultad de obtención de la medida in situ harían posible plantearse el estudio de un posible nuevo parámetro de cálculo energético que tuviese en consideración el balance de calor incluido el calor latente y que acercase más al comportamiento higrotérmico y energético conjunto real, en particular, de la fachada ventilada, y en definitiva de cualquier cerramiento en un tipo de clima similar a Csb.

VII.2 MÉTODO Y NORMATIVA

Este segundo apartado del capítulo VII de discusión y recomendaciones de diseño aborda las controversias encontradas durante el procedimiento realizado. En particular el apartado se divide en dos partes. La primera toma en consideración la instrumentación, procedimiento seguido y la incertidumbre manejada. Finalmente y en segundo lugar se discute las normativas de aplicación proponiendo posibles nuevos enfoques a las mismas.

VII.2.1 INSTRUMENTACIÓN, PROCEDIMIENTO E INCERTIDUMBRE

En relación con la colocación de los sensores, tapado y adhesión, se advirtieron dos métodos de fijación a la superficie de los sensores de flujo de calor. Sistema mediante fijación mecánica o adhesivo, siempre y cuando la superficie fuese regular. (Hulme y Doran, 2014) utilizaron una fijación mecánica a presión consistente en una abrazadera de conexión flexible y un mástil vertical. Para asegurar la buena conexión térmica se dispuso de vaselina y una muy fina capa de polietileno.

(Rhee-Duverne y Baker, 2013) y (Rye y Baker, 2011) para la fijación de los sensores de flujo de calor utilizaron una cinta adhesiva de doble cara y una cinta adhesiva de baja adhesión aplicada en el muro. Cuando las superficies del muro eran irregulares, se utilizó una cantidad pequeña de sellador de silicona.

El fabricante suministrador del sensor recomienda varias soluciones como *los adhesivos o epoxis convencionales. También se puede utilizar la cinta por doble cara adhesiva tipo Mylar, el epoxi OB-200 de Omega y una cinta fina de poliéster.*

Finalmente el ensayo de febrero marzo del 2016 fue realizado con una cinta de tela, adhesiva con armado de fibras gris. La segunda prueba de verificación analizó la influencia en relación de utilizar otro tipo de fijación que no tuviese el tapado por el exterior con cinta fina adhesiva de poliéster. Los resultados obtenidos de esta pequeña prueba advirtieron de la obtención de resultados más elevados en la situación de los sensores tapados.

La prueba de verificación décimo quinta entre diciembre y enero del 2017 se realizó utilizando silicona en contacto del sensor con el aplacado de granito. Para la superficie exterior del sensor se usó una cinta adhesiva de papel.

Ficco et al, (2015) indica en el cuadro de incertidumbres de los valores extraídos in situ un rango entre un 2 a un 5%.

En relación a la instrumentación elegida, se verificó si la instrumentación elegida si era la adecuada para la toma de datos, en la prueba de verificación novena se realizaron recogidas de datos para la obtención del valor U. Se concluyó que para realizar la medida del valor U es necesario, si se utiliza el método TBM, que los sensores tengan alta sensibilidad. Si esto no ocurre las diferencias son grandes y los resultados no son los esperados.

La elección de la instrumentación adecuada para la recogida de los valores de humedad relativa es importante. Se observó que el Tinytag daba problemas de medida en altas humedades relativas y en el caso de precipitaciones, a pesar de ser expresamente adecuado

para situaciones climáticas exteriores. En las pruebas de verificación se optó por la utilización de sensores de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo y mejorar el dato de humedad relativa.

De acuerdo al procedimiento de adquisición de datos, la norma ISO 9869:2014 establece que los datos de los HFM y los sensores de temperatura se registrarán de forma continua o en intervalos fijos durante un periodo de días completos. El periodo máximo de tiempo entre dos registros y la duración mínima del ensayo depende de la naturaleza del elemento (pesado, ligero,...) temperatura exterior e interior y el método utilizado para el análisis. La norma también indica que una recogida típica de datos sería de 0,5 a 1h para el método de la media y puede ser menos para el método dinámico.

Las referencias consultadas varían. Marinosci et al, (2014) realizaron recogidas de datos en intervalos de 5 minutos. Con estos intervalos fueron construidas las medias horarias de cada parámetro climático monitorizado. Autores como Rhee-Duverne y Baker (2013) indican que para los sensores dispuestos en el interior se adquirieron los datos en intervalos de 5 segundos y promediando cada 10 minutos. Las temperaturas externas se recogieron en intervalos de 5 minutos. Hulme y Doran (2014) tomaron mediciones puntuales cada minuto. Con esas mediciones puntuales, el registrador de datos realizó un promedio a lo largo de un periodo de 15 minutos siendo esa la anotación de la lectura. En los estudios de Rye y Baker (2011), los datos de los sensores fueron recogidos en intervalos de 5 segundos y promediados sobre 10 minutos. Los datos de los Tinytag fueron recogidos cada 1 minuto y promediados cada 10 minutos.

Inicialmente la toma de medidas fue realizada cada 15 minutos, tomando un solo valor. A partir de ahí se realizaron pruebas de verificación y medida que aumentaron la recogida de datos en la línea de los autores anteriores. Se realizaron diferentes pruebas, como valores recogidos cada segundo y promediados cada 10 minutos. Valores recogidos cada 60 segundos y promediados cada 15 minutos. Los resultados observados difieren de los primeros, ya que el valor indicado en los 15 minutos ha supuesto un promedio muy elevado y representativo.

Se comprobó en los experimentos de control y verificaciones que la adquisición de datos mediante medias horarias obtenidas de cada segundo (3600 muestras por cada dato) mejoraba y reducía considerablemente el error.

Incertidumbre de la medida. La sensibilidad de los sensores de flujo de calor elegidos posee una sensibilidad modesta. La norma ISO 9869:2014 establece el procedimiento para el cálculo el valor U. Un valor estático y representativo. En el artículo *Research into the thermal performance of traditional brick walls* se evalúa la incertidumbre general sobre el valor estimado de U según diferentes diferencias de temperatura entre el exterior y el interior. Indica que éste se calcula con el valor de la raíz cuadrada de las desviaciones de cada error y la desviación estándar, siendo los errores del termoflujómetro, la temperatura interior y la temperatura exterior, respectivamente.

Se puede resumir que la exhaustividad del proceso ayuda enormemente a la consecución de los objetivos planteados, en este caso la obtención de unos valores de medida fiables para su tratamiento posterior.

VII.2.2 NORMATIVA APLICADA

Se han considerado hablar de las normas y procedimientos más relevantes y que más condicionan ahora mismo el diseño constructivo del detalle. En este caso es el CTE y el caso que ocupa la ISO 9869:2014 para el cálculo del parámetro térmico.

Finalmente se ha comprobado también que el procedimiento alternativo del análisis numérico de simulación mediante el software Wufi Pro 5.3 es una herramienta muy útil, que puede evitar en ciertos casos realizar tomas de datos *in situ*, algunas complejas, poco económicas y que necesitan gran conocimiento de la instrumentación para su puesta en funcionamiento.

El CTE y los DB HE-1 y DB HS-1

Térmico

Como considera Pérez Bella (2012) la humedad tiene relevancia en el comportamiento térmico de la envolvente en los siguientes puntos 1. La conductividad térmica de los materiales del cerramiento varía en función del contenido de humedad; 2. La cantidad de humedad condensada y evaporada propicia la liberación y absorción del calor latente en el cerramiento; 3. La variación de la temperatura en los materiales hace variar la resistencia térmica del cerramiento y 4. Los puntos anteriores generan cambios en la distribución de temperaturas y presiones de saturación de interfaces, alterando la fiabilidad del cálculo realizado.

Se ha detectado que tampoco la normativa establece de forma explícita la importancia del hecho del incremento de la conductividad térmica por el aumento de humedad. No se tiene en consideración los cambios de estado que pueden producirse en climas húmedos y que son de gran relevancia a nivel de energía y de valor similar a los producidos por las diferencias de temperatura entre el interior y exterior en este tipo de climas.

Se ha detectado, por tanto, que este tipo de sistema constructivo de fachada ventilada no está adecuadamente definido para ser una solución óptima en este tipo de climas. Se abre la necesidad de tener una herramienta que pueda predecir un comportamiento entre unos rangos aceptables.

Este tipo de soluciones de patrones ha sido estudiado ya previamente por otros investigadores como es el caso de Kumaran et al (2003) dentro del marco de proyecto MEWS. Se trataba de obtener un parámetro de evaluación de la respuesta del cerramiento ante una solicitud externa. Este parámetro se denomina índice RHT (índice de humedad relativa y temperatura), que debe ser utilizado en conjunción con una herramienta de simulación numérica como el Wufi Pro 5.3. Se definen unas condiciones numéricas que se consideran desfavorables para la durabilidad del cerramiento. Permite establecer la mejor o peor utilidad de un cerramiento.

Hídrico

Los resultados obtenidos del análisis numérico de simulación de los cuatro tipos de cerramiento y explicados en el capítulo anterior, advierten que estas soluciones constructivas no tienen un funcionamiento similar desde el punto de vista higrotérmico y por lo tanto no deberían ser equiparadas entre ellas. Es decir, para un mismo Grado de Impermeabilidad,

puede ser satisfecho mediante soluciones constructivas diferentes pero que tampoco comparten un similar y beneficioso comportamiento higrotérmico en todos los casos.

Aquí el hecho de no considerar el comportamiento higrotérmico del cerramiento de forma conjunta en la norma, provoca al diseñador pensar en diseños parciales que cumplan independientemente cada documento pero no se piensa en su unidad creando, en definitiva, más riesgo de problemas e incompatibilidades en los cerramientos

La realización de estas simulaciones ayuda a comprender algunos de las deficiencias detectadas en este apartado del HS-1 del Código, y en particular en las condiciones de las soluciones constructivas, (véanse las letras). No se encuentran valores objetivos de parámetros hídricos, y se centra fundamentalmente en la higroscopicidad y absorción de los materiales. Para la comunidad científica, el mayor problema del deterioro de los cerramientos no está en el ingreso de agua líquida sino en la forma que tiene este cerramiento de permanecer seco y transpirar. Este documento no tiene en consideración adecuadamente otra propiedad hídrica relevante como es la permeabilidad al vapor de agua, porque tan sólo es considerada en el revestimiento exterior. El riesgo de condensaciones producido por el vapor de agua ambiental es verificado mediante el procedimiento UNE EN ISO 13788:2002 de forma independiente y separada en otro documento básico (DB HE-1). No se trata nada más que de evitarlo tal y como recomienda CISBE en su guía A, y expresado ya en el capítulo II.

Podría ser relevante plantear o incorporar un parámetro que reflejase un índice de riesgo ambiental como el Moisture Index o MI. Durante el capítulo II fue obtenido de A Coruña y comparado con Vancouver en Canadá obteniéndose unos valores muy similares de riesgo. Pérez Bella (2012) introduce también otro posible parámetro ya explicado en el capítulo II.

Finalmente se considera que la norma DB HS-1 debería proponer la incorporación del parámetro de λ de diseño con la corrección por humedad para ciertas localizaciones climáticas.

Norma ISO 9869:2014

En el caso de seguir el procedimiento del método de la media descrito en la toma de datos de la densidad de flujo de calor para la obtención del valor de transmitancia térmica, es importante conocer no sólo el tipo de cerramiento sobre el que se realizará el ensayo, sino también el clima en el que se dispone. De hecho la norma no indica nada sobre el clima sobre el que se realiza el ensayo, pero al final expone como errores de medida causados un alto contenido de humedad y/o cambios de estado del agua. Teniendo un clima con altas concentraciones de agua en forma de humedad relativa y/o precipitaciones, se va a dificultar e incluso imposibilitar obtener una medición adecuada del valor de transmitancia térmica. Esto es debido a que se está midiendo una densidad de flujo de calor no producida por la conducción, sino como se explicó anteriormente por lo cambios de estado.

Una diferencia de error de más del 20% entre el valor calculado y obtenido en la medición puede ser posible por lo que la complejidad de obtención del dato es más que evidente. Finalmente en este tipo de climas puede llegar a ser imposible obtener un valor veraz. Los

datos de simulación indicaron un incremento del 19% del valor U en los meses de invierno y lluvias.

Sin embargo, dada la importancia del flujo de calor debido a los cambios de estado, es necesario una cuantificación de este flujo y/o la definición de otro parámetro que pueda incorporar el verdadero flujo de calor que atraviesa por el cerramiento.

En esta línea Kosmina (2016) concluía en sus estudios que el método de la media es adecuado para medidas in situ de valor U pero puede conducir a largos periodos de medida y puede dar valores erróneos en ciertos casos, por lo tanto este método podría no ser adecuado para establecer los valores U para una simple vivienda con la finalidad del certificado de comportamiento energético en Escocia.

El nivel de incertidumbre para la obtención del valor U se incrementa cuando la diferencia de temperaturas ambientales tomadas entre el interior y el exterior es pequeña. Con una diferencia de temperatura de 0,9K, la incertidumbre general calculada sería del 93%. En el caso de 8.3K la incertidumbre se reduciría a apenas 8%. En un clima analizado como este una gran diferencia de temperaturas es difícil alcanzarla. (Baker, 2013)

En la situación concreta de la monitorización, se tomó la decisión de encender la calefacción para realizar la medición. Ello provocó una estratificación de temperaturas y una fuerte componente convectiva que hace, como consecuencia, más compleja la obtención del valor U. Además estas diferencias térmicas necesarias no son representativas del normal comportamiento higrotérmico del cerramiento del edificio. Es necesario hacer una reflexión sobre la utilidad de este parámetro a nivel energético para esta solución concreta.

Una de las dificultades encontradas en la norma es la elección del correcto valor de las temperaturas para la toma de medidas in situ. La norma no indica con claridad, por ejemplo, cuál debe ser la posición exacta para la recogida de la temperatura ambiental, tanto exterior como interior. Se ha confirmado, con los ensayos realizados en esta tesis doctoral, que ello es de gran relevancia. La norma advierte que unos de los problemas de las grandes diferencias encontradas entre el valor calculado y el obtenido in situ pueden ser debido también a la toma de datos de temperaturas. La falta de claridad en el procedimiento de toma de datos de temperatura, introduciendo constructos teóricos posteriores dificulta y da mayor complejidad a la obtención del parámetro y da poca coherencia con el título inicial de la norma de medidas *"In situ"*

Otras de las críticas indicadas en el estudio de Kosmina (2016) establece que para recoger valores de U de medidas in situ se requiere un alto nivel de habilidades, el personal requerirá tener experiencia y educación relevante y demostrar competencia en el proceso, y de uso de equipamiento y análisis de datos, se requiere mucha pérdida de tiempo y es caro. Tras la realización de este estudio, se ha llegado a esta misma conclusión que es totalmente compartida en todos sus enfoques.

Sin embargo, es de reseñar que mediante el procedimiento del método de la media también se han obtenido valores de transmitancia térmica prácticamente iguales que los de cálculo en el cerramiento de termoarcilla, cerramiento de granito y vidrio doble en Vigo (Pontevedra).

Sólo en el caso de la fachada ventilada de granito analizada se han obtenido mayores diferencias. Los motivos por los cuales debe haber existido esa diferencia pueden haber sido el contenido total de agua del cerramiento. Realizadas las simulaciones se detectó la capacidad de contener gran cantidad de agua para el cerramiento de Coruña en relación con el de Vigo, de un orden del 4 al 20 Kg/m².

En definitiva y para concluir, se debería reconsiderar el procedimiento del método de la media de toma de datos in situ y no ser considerado como una búsqueda de condiciones para expertos, algunas de las cuales imposibles de conseguir en ciertos climas. Debería también plantearse un procedimiento y/o parámetro alternativo para condiciones con altos contenidos de humedad relativa ambiental y de los materiales. La humedad se vincula también con la energía y no tomarla en consideración podría dar lugar a errores no considerados al diseñar los próximos edificios de consumo casi nulo.

VII.3 PARÁMETROS QUE INFLUENCIAN

Llegados a este punto, y tras enumerar los hallazgos encontrados en el análisis, se hace necesario incluir un listado de parámetros que, bajo estas condiciones climáticas analizadas, son los que más influyen en su comportamiento higrotérmico.

Este apartado da cuenta de los parámetros que se han detectado sensibles y de gran relevancia, sobre todo en la optimización del secado y equilibrio hídrico. Finalmente se recoge una posible organización de los parámetros a través de un perfil gráfico de comportamiento óptimo representando los parámetros.

VII.3.1 PARÁMETROS SENSIBLES

Los parámetros son organizados en tres ámbitos: ambiental, material y sistema y son enumerados a continuación.

Riesgo ambiental

- a) Temperatura
- b) Humedad relativa
- c) WDR
- d) Fuentes adicionales de agua

Riesgo material

- a) Coeficiente de absorción por capilaridad
- b) Permeabilidad al vapor de agua
- c) Conductividad térmica

Riesgo sistema

- a) Contenido total de agua
- b) Transmitancia térmica

Riesgo ambiental:

Se corresponden a estos parámetros, todos los relativos a los que caracterizan los ambientes

a) Temperatura

El parámetro de la temperatura es importante, ya que a mayor temperatura, más capacidad de contener agua el ambiente. Además, este parámetro también es de gran importancia cuando se habla de radiación directa, ya que aumenta la temperatura. La diferencia entre diferentes áreas puede provocar movimiento de aire y por lo tanto facilitar el secado

b) Humedad relativa

El parámetro de la humedad relativa es destacado ya que da una relación de la cantidad de vapor de agua que existe en el ambiente. Manifiesta también la carga

hídrica que posee el ambiente para localizar un ambiente. En Canadá se desarrolló el parámetro **Moisture Index o MI**, que relaciona, no sólo las cargas hídricas sino también la capacidad que tiene el agua de secarse mediante, por ejemplo, el viento. Es un parámetro para el secado estacional o anual.

c) WDR

En el caso de la lluvia dirigida por viento, es otra carga hídrica que se debe tener en consideración puesto que correlaciona la mayor carga hídrica con el mayor riesgo de deterioro del cerramiento y por lo tanto, peor comportamiento higrotérmico.

Riesgo del material

a) Coeficiente de absorción de agua por capilaridad

Este parámetro es importante cuando se plantea el ingreso de agua en un cerramiento, sobre todo los materiales muy expuestos a altas precipitaciones. El material en contacto con el exterior deberá tener un valor controlado.

b) Permeabilidad al vapor de agua

Este parámetro indica la facilidad que el vapor de agua en el ambiente es capaz de atravesar un cerramiento. En el caso de ambientes con altos contenidos de humedad, una concentración de vapor de agua puede rápidamente provocar la condensación. Asimismo retrasar el movimiento de ese vapor de agua puede también acumular vapor y condensar.

c) Conductividad térmica

El parámetro más importante desde el punto de vista de pérdida de calor o temperatura en el interior de un local. Los estudios han mostrado que la posición por el exterior reduce el contenido de agua en el cerramiento. Mantener seco el cerramiento supone no empeorar las magnitudes de conductividad térmica.

Riesgo del sistema

a) Contenido total de agua

Este parámetro demuestra la cantidad de agua que posee en su interior. Controlar su valor, impidiendo que crezca a lo largo del tiempo es importante. alguna normativa europea establece que no debe ser incrementado.

b) Transmitancia térmica

Es un parámetro determinante en la legislación para la preevaluación del comportamiento energético del edificio. La influencia de la humedad demostrada en este clima de A Coruña, viene a indicar la importancia de tener en consideración la energía que supone estar en un clima húmedo de estas características. La transmitancia térmica deberá ser lo más baja en los meses en los que la diferencia de temperatura sea mayor.

VII.3.2 RECOMENDACIONES AL PRESCRIPTOR EN EL PROCESO DE DISEÑO

Diseño del cerramiento de fachada ventilada de granito

- a) Hoja en contacto con el exterior
- b) Configuración de la cámara de aire
- c) La posición del aislamiento
- d) La hoja interior

Tras el estudio realizado del comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada de granito orientada al norte en clasificación climática Csb, finalmente se dan unas recomendaciones para el prescriptor sobre un futuro diseño. Se advierte que estas recomendaciones atienden sólo en relación a los estudios realizados y con sus limitaciones, ya que el mismo tipo de cerramiento en otras condiciones climáticas y orientaciones no poseen tanto riesgo hídrico y empeoramientos en los valores U de transmitancia térmica. De hecho de las cinco distintas clasificaciones climáticas analizadas en España, las simulaciones mostraron que el cerramiento en la localización de A Coruña es la que obtuvo los peores resultados.

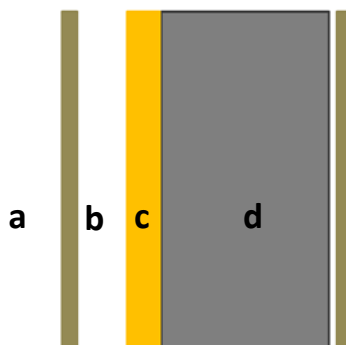


Figura VII.4: Partes de la fachada ventilada analizada. a. Hoja exterior, b. cámara de aire, c. aislamiento y d. hoja interior

a) Hoja en contacto con el exterior

Es la parte de la fachada que se corresponde con la primera línea de defensa de un cerramiento y, en concreto, una de sus funciones es controlar la penetración del agua hacia el interior del edificio. En este caso, las recomendaciones de diseño se basan en **dos acciones**, primera reducir y minimizar el riesgo de penetración de agua al material de la hoja en contacto con el exterior y, como consecuencia, al interior del edificio y segunda, si una vez ha entrado, que esa agua y/o vapor de agua ingresada tenga la capacidad de salir.

Para decidir el material, habrá que evaluar sus **propiedades hídricas**. En el caso de la fachada ventilada analizada se detecta que el granito se moja y en los procesos de secado lo realiza tanto hacia el ambiente como hacia la cámara ventilada. Ello produce como consecuencia la elevación de la humedad relativa y de la presión de vapor de agua en el aire de la cámara ventilada limítrofe.

En el caso de la primera acción de reducir el ingreso de agua, la **porosidad abierta** del material en contacto con el exterior es importante. En este caso ensayado y según diferentes estudios, se sugiere que el granito posea un acabado flameado o pulido para poder responder mejor al no ingreso del agua y no un acabado abujardado como fue el colocado. Además, esta

propiedad está intrínsecamente ligada al nacimiento de algas y hongos, debido a la capacidad para acceder al interior del material el nutriente esencial del organismo vivo.

Se puede evitar el ingreso de agua también de forma geométrica. En este sentido, la norma alemana establece la sección de los cantos que impida el ingreso del agua por capilaridad o fuerza cinética, las más desfavorables en este tipo de fachadas.

Una vez que el agua ha ingresado, la propiedad de **absorción** del material será relevante, mejor cuanto menos agua sea capaz de absorber. Habrá que analizar las curvas de sorción y desorción. El material es un potencial fuelle de expulsión y captación de agua, mejor que tenga gran capacidad de absorber pero también de ceder rápidamente y que no sea mucha cantidad. Para evitar el ingreso de agua, el parámetro del **coeficiente de absorción de agua líquida A** [$\text{Kg/m}^2\text{s}^{0.5}$] deberá ser lo más bajo posible.

Pero en este tipo de clima analizado Csb, el vapor de agua es una carga hídrica para el cerramiento tan importante como las precipitaciones.

Para facilitar el secado del material y permitir el movimiento del vapor de agua, se deberá tener en consideración el parámetro de **permeabilidad al vapor de agua** [$\text{Kg}/(\text{msPa})$]. Se elegirán en primera línea de defensa materiales con alta permeabilidad al vapor de agua.

En cuanto a los análisis numéricos realizados al variar el espesor de la hoja exterior de granito mostraron que la hoja con menos espesor estaba más seca que la hoja con mayor espesor. El hecho de duplicar el espesor de la hoja de 3 a 6cm no se obtuvo una gran diferencia significativa en el secado. Este estudio fue realizado con materiales absorbentes.

b) Configuración de la cámara de aire

Cuando se habla de fachada ventilada en España, en general, se asocia a la protección solar. El aire del interior de la cámara de aire, tras la hoja exterior, actúa como un efecto chimenea por el que asciende al calentarse debido a la radiación solar a lo largo de su altura.

Esta forma de funcionamiento no existe cuando la solución se dispone para climas lluviosos y en orientaciones sin radiación solar directa. Aquí, la hoja exterior delante de la cámara actúa como un paraguas, y es el tiro hídrico, debido a la diferencia de contenido de vapor de agua, lo que provoca el movimiento del aire en su interior.

Para la consideración de la cámara de aire, el C.T.E. DB-HS-1 define dimensionalmente la cámara de aire ventilada y sus orificios de renovación de aire.

Para responder a cuál sería el espesor ideal, fueron realizados análisis numéricos de simulación de diferentes tipos de **espesor de la cámara de aire** de la fachada ventilada, manteniendo una renovación constante de aire, y observar cual era el contenido de agua al final de los cinco años tras someter al clima de A Coruña. Los resultados mostraron que, en general, el aumento de espesor (de 2cm a 15cm) contribuye al mayor secado del cerramiento y a un mejor valor de transmitancia térmica de la fachada. Lógicamente al perder agua el cerramiento, al final de la simulación todas las cámaras de aire incrementaron su humedad y la que menos, la de mayor espesor. La de 9cm no ha tenido mucha diferencia con la de 15cm.

En la misma clasificación climática Csb, los investigadores (Straube y VanStraaten, 2004) cambiando la cavidad de aire de 20 a 50mm en un muro de ladrillo, no existió diferencia reseñable en la capacidad de secado. Es de destacar que las simulaciones efectuadas entre los valores de 2 y 5cm ha existido una diferencia en la capacidad de secado del cerramiento de un 0,42% de diferencia, por lo que se puede corroborar este hecho.

De hecho, Kristine Nore indica que en la actualidad, hablando del 2011, las recomendaciones noruegas en el diseño de la fachada ventilada tipo *rainscreen* indican incrementar la profundidad de la cámara de aire de acuerdo a la cantidad de lluvia dirigida por el viento.

En el caso del **ratio de intercambio de aire** (orificios) en la cámara ventilada se barajaron en las simulaciones desde una cámara sin renovación hasta una con 857 renovaciones por hora, situación de la fachada ventilada real. Se concluyó que la mayor ventilación provocaba un mayor secado. El rango de renovaciones Entre 50 y 200 renovaciones de aire, la fachada poseía aproximadamente la misma capacidad de secado. Pasar de 10 a 20 renovaciones por hora, sin embargo, la reducción es relevante, aunque al final de la simulación, y en estos casos, existía más agua que al principio.

Hay que tener en consideración que el clima es una circunstancia que no puede ser evitada. De hecho autores como (Rousseau y Dagliesh, 2004) expusieron que cuando las condiciones, tanto exteriores como interiores, de humedad sean más altas, menos secado por evaporación de la cavidad mojada se producirá.

En todo caso, los resultados obtenidos de la monitorización in situ de la cámara ventilada orientada al norte, han advertido una humedad relativa más elevada que la del exterior, empeorando como consecuencia las condiciones ambientales hídricas al cerramiento. Por tanto, se puede corroborar los estudios de (Suarez et al, 2012) donde se concluye que la fachada con cámara ventilada se comporta un poco peor sin radiación solar o los de (Enedi, 2013) donde para una clima Csb, misma clasificación climática se llega a la conclusión que mejor es disponer un cerramiento con una cámara no ventilada.

c) La posición del aislamiento

La primera pregunta sería sobre la posición que debería ocupar el aislamiento en el conjunto del cerramiento desde el punto de vista hídrico. Para este caso, los resultados de los análisis numéricos en el clima Csb han mostrado que la **posición del aislamiento** por el exterior favorece que el cerramiento esté más seco que en el caso de la posición en el interior del mismo. Se recomienda en este tipo de clima utilizar la posición por la cara exterior.

En cuanto al **espesor óptimo del aislamiento**, y en concreto del poliuretano, se ha estudiado también desde el punto de vista higrotérmico. Al incrementar el espesor del poliuretano de 3 a 30 cm, se observó que el contenido de agua en el poliuretano también aumentaba. Para el cumplimiento del valor de la transmitancia térmica, a pesar que los datos estáticos cumplían con las condiciones de la normativa, los valores representativos mensuales de U fueron superiores al valor exigido. Se descubrió que para que esto no sucediese debería ser utilizado un espesor de al menos 15cm de poliuretano. Situación contradictoria, ya que el aumento de espesor es proporcional al aumento de contenido de agua en el cerramiento.

Las **propiedades hídricas** se advierten también aquí importantes. De hecho existen numerosos aislamientos, que siendo del mismo tipo varían enormemente los rangos de valores como el del **coeficiente de resistencia a la difusión de vapor de agua** μ . Debe ser revisada esta circunstancia. De hecho, los análisis numéricos se vieron influenciados por la variación de estos parámetros. En el caso particular del poliuretano, con valores altos del coeficiente de resistencia al paso de vapor de agua actuará como una especie de barrera retardadora al paso del vapor de agua, valores tales como 180. Debería protegerse el aislamiento en la posición hacia la cámara. Ello también evitaría un deterioro superficial y la pérdida de sus propiedades.

d) Hoja interior

La **subestructura** se dispone sobre la hoja interior normalmente resistente. Ésta debe ser diseñada para evitar los puentes térmicos. En el caso de no elegir tipos de plásticos para su enlace con la hoja interior y/o forjado, deberá interponerse una pieza que sea no conductora del calor.

Es importante conocer el comportamiento de la **curva de sorción** y la permeabilidad al vapor de agua del material elegido en la hoja interior del cerramiento. Se debe controlar también el valor de μ , el **coeficiente de resistencia al paso del vapor de agua** y su evolución en el proceso de secado. Los ensayos realizados mostraron que la inadecuada elección de valores altos de μ puede retrasar el secado del cerramiento para obtener un equilibrio con el entorno. El cerramiento con valor alto en μ de la hoja interior tardó 20 años en equilibrarse hídricamente con el entorno. Se mostró en las simulaciones que, para climas como éste, los ladrillos cerámicos se comportan mejor que el hormigón, con tiempos de equilibrio de secado de 3 años.

Asimismo también deberá tenerse en consideración la estrategia de elección de materiales y sus propiedades y en particular en relación a la resistencia al vapor de agua y la resistencia térmica para evitar que existan condensaciones intersticiales.

En el aspecto térmico es de señalar la importancia en este tipo de climas de extraer el valor de conductividad térmica en estado húmedo, es decir, conocer el comportamiento más similar al que va a estar expuesto. Este valor no sólo es importante en la hoja principal, sino también en el valor del aislamiento térmico.

Finalmente habrá que tener mucha precaución en la utilización de la barrera de vapor. Las condiciones ambientales normalmente definen la cara caliente del cerramiento que en este caso ha sido el interior. Sin embargo, esta situación puede ser alterada en los meses de verano donde el exterior es la cara caliente, provocando el riesgo de condensaciones debido a la mala posición de la barrera impermeable.

VII.4 SÍNTESIS CRÍTICA DEL CAPÍTULO VII

Durante el desarrollo del capítulo de discusión y recomendaciones de diseño, se ha podido satisfacer el objetivo principal de conocer el comportamiento higrotérmico característico de la fachada ventilada de granito objeto de análisis en este trabajo. Este objetivo principal se ha desarrollado a través de objetivos específicos indicados en los apartados y que son los siguientes:

El comportamiento higrotérmico característico observado en la fachada ventilada de granito con orientación norte y en la época de otoño e invierno (enero y febrero del 2017), se halló que este cerramiento tiene gran capacidad para contener agua y que esta capacidad ha empeorado consecuentemente sus condiciones de comportamiento térmico, en particular la transmitancia térmica.

En segundo lugar describir y discutir los hallazgos más relevantes en relación a los aspectos hídricos y térmicos. En concreto, se han organizado en función del ambiente exterior, del proceso de mojado y secado del cerramiento y del flujo de calor y transmitancia térmica o valor U.

. Los resultados del **ambiente** mostraron una humedad relativa exterior alta con riesgo de nacimiento de cianobacterias y algas. En cuanto a la cámara de aire, se mostró que algunas veces la humedad relativa era superior a la ambiental. Y finalmente que las condiciones climáticas habían influido en el comportamiento higrotérmico y como consecuencia en la transmitancia térmica.

. En el caso de los procesos de **mojado y secado en el cerramiento**, se halló que el secado es largo en este cerramiento. Que la fachada ventilada no influye en el secado del cerramiento y que no hay tiempo suficiente para el secado. También se observó ser de gran relevancia que las propiedades de los materiales componentes como el coeficiente de difusión al vapor de agua y el coeficiente de absorción de agua líquida influyen en su comportamiento higrotérmico.

.Con respecto a la **densidad de tasa de flujo de calor**, se detectó un patrón de comportamiento en los cerramientos analizados en función de la orientación y época estacional (otoño o invierno). En concreto el movimiento diario de q_i está en contrafase con la temperatura exterior. También se observó que la humedad influye sobre la densidad de tasa de flujo de calor interior registrado. Concretamente se realizaron ecuaciones de regresión donde se obtuvo que el parámetro de la humedad relativa interior explicaba en un segundo orden el comportamiento del valor de q_i .

En cuanto a la **transmitancia térmica**, el valor monitorizado de $0,73\text{W/m}^2\text{K}$ (recogido de los valores climáticos in-situ), fue muy similar al obtenido por simulación en el mes de febrero utilizando valores climáticos normales. Sin embargo, la diferencia en relación al cálculo tanto de U_{seco} como de U_{80} , osciló entre un 4% y hasta un 16,8%. En todo caso, estos valores se han desviado en más del 15% del valor de transmitancia térmica calculada según CTE y la obtenida en la simulación.

El hecho de utilizar unos valores más parecidos a los obtenidos en la monitorización, supone considerar un incremento de las pérdidas de energía del cerramiento de fachada ventilada de granito de un 15,6% con respecto a los valores de cálculo, es decir, pasar de 21,2 kWhm²/año a 24,5kWhm²/año.

Finalmente se han elegido los parámetros que se han considerado más relevantes y se han establecido unas **recomendaciones** tras el análisis de los resultados y los hallazgos encontrados. Estas recomendaciones se han expuesto en función de las diferentes capas del cerramiento.

. En cuanto a la **hoja exterior**, es de gran relevancia en ambientes con gran carga hídrica las propiedades hídricas del material, en particular el coeficiente de absorción de agua y la permeabilidad al vapor de agua.

. En cuanto a la **cámara de aire**, el espesor ideal resultado de los análisis de simulación efectuados concluyó que era la cámara de aire de 9cm. En cuanto a la renovación de aire, los resultados concluyeron que a mayor renovación de aire en la cámara ventilada existe menor contenido de agua en el cerramiento. La suposición de renovaciones como en las que habitualmente se realizan en el tipo de cerramiento rainscreen wall, supondría un incremento del contenido de agua en relación al inicio. Se plantea la posibilidad tras los resultados obtenidos que se cierre la cámara de aire en la orientación analizada.

. La posición del **aislamiento** por el exterior favorece que el cerramiento esté más seco que la suposición del cerramiento hacia el exterior. La elección del espesor óptimo debe ser realizada en concordancia con el parámetro del coeficiente de difusión del vapor de agua o μ , ya que cuanto más alto sea el espesor con un valor alto de μ , más retención de contenido de agua habrá en el cerramiento y peor valor obtenido de transmitancia térmica. En el caso analizado se obtuvo que para que se cumpliesen las condiciones del CTE de transmitancia térmica límite durante el año (situación realizada con simulación), el espesor debería de ser de 15cm y no de 9cm como el cálculo indicaría. Esto lleva a indicar la elección de aislamientos con muy bajo coeficiente de difusión a la permeabilidad del agua.

. Finalmente la hoja interior vuelve a ser relevante la permeabilidad al vapor de agua, eligiendo materiales lo más permeables posibles. La facilidad de secado en la hoja del cerramiento debe ser considerada. Asimismo se debería elegirse materiales que tuviesen poca capacidad para almacenar agua, tanto en estado líquido como en vapor. Si la variación de contenido de agua en el cerramiento es baja, la variación de la transmitancia térmica también será pequeña y el valor de cálculo será más similar en estos casos al valor que posiblemente se comportaría en la realidad.

Se recuerda que estas recomendaciones tienen su ámbito para la situación climática de A Coruña, con la orientación norte y en este tipo de fachada con estos materiales que se han considerado. Se observa la necesidad de realizar más investigaciones que pudiesen realizar más predicciones.

VII.4 CRITICAL SYNTHESIS OF CHAPTER VII

During the discussion chapter and design recommendations, it has been possible to satisfy the main objective of knowing the hygrothermal behavior characteristic of the open-joint ventilated granite façade object of analysis in this work. This main objective has been developed through specific objectives indicated in the sections and as follows:

Hygrothermal behavior observed in the ventilated façade of granite with north orientation and in the autumn and winter season (January and February of 2017), it was found that this envelope has great capacity to contain water and that this capacity has consequently worsened its conditions of thermal behavior, in particular thermal transmittance.

Secondly, the most relevant findings in relation to water and thermal aspects were described and discussed. In particular, they have been organized according to the external environment, the process of wetting and drying the envelope and the heat flow and thermal transmittance or U-value.

. The results of the **environment** showed a high external relative humidity with birth risk of cyanobacteria and algae. As for the air cavity, it was shown that sometimes relative humidity was higher than exterior. Those climatic conditions had been influenced by hygrothermal behavior and as a consequence in the thermal transmittance.

. In the case of **wetting and drying processes in the envelope**, it was found that drying is long in this envelope. That ventilated façade does not influence drying of the envelope and that there is insufficient time for drying. It was also found to be of great relevance materials properties such as the diffusion coefficient to water vapor and the coefficient of absorption of liquid water influence its hygrothermal behavior.

With respect to the **density of heat flow rate**, a behavior pattern was detected in the envelopes analyzed according to orientation and seasonal period (autumn or winter). In concrete the daily movement of q_i is in opposition with the outside temperature. It was also observed that moisture influences the recorded indoor heat flux density. Specifically, regression equations were performed where the internal relative humidity parameter was explained in a second order by the behavior of q_i .

As for **thermal transmittance**, monitored value of $0,73\text{W/m}^2\text{K}$ (collected from on-site climatic values) was very similar to that obtained by simulation in the month of February using normal climatic values. However, difference between the calculation of both U_{seco} and U_{80} , ranged between 4% and up to 16,8%. In any case, these values have deviated by more than 15% of the value of thermal transmittance calculated according to C.T.E. and that obtained in the simulation.

The use of values more similar to those obtained in the monitoring, supposes to consider an increase of the energy losses of the ventilated façade of granite of 15,6% with respect to the values of calculation, that is to say, to pass from $21,2\text{ kWhm}^2/\text{year}$ at $24,5\text{ kWhm}^2/\text{year}$.

Finally, most relevant parameters and recommendations have been chosen and established after result analysis and findings. These recommendations have been explained according to different layers of the envelope.

- . As for the **outer layer**, moisture properties, in particular water absorption coefficient and water vapor permeability, are of great relevance in environments with high moisture loads.

- . As for the **air cavity**, the ideal thickness resulting from the simulation analyzes carried out concluded that it was the 9cm air cavity. As for the air renewal, results concluded that the greater air renewal in the ventilated cavity there is less water content in the envelope. The assumption of renovations as in those that usually are realized in the type of envelope rainscreen wall, would suppose an increase of the water content in relation to the beginning. The possibility is posed after results obtained that the air cavity is closed in the orientation analyzed.

- . **Insulation** position on the outside benefits a drier envelope than the supposition of the envelope towards the inside. The choice of the optimum thickness should be made in accordance with the parameter of the water vapor diffusion coefficient or μ , since the higher the thickness with a high value of μ , the more retention of water content will be in the envelope and worse value obtained from thermal transmittance. In the case discussed, it was obtained that, in order to comply with the threshold limit thermal transmittance CTE conditions during the year (situation performed with simulation), the thickness should be 15cm and not 9cm as the calculation would indicate. This leads to indicate the choice of insulation materials with very low diffusion coefficient to water permeability.

- . Finally the **inner layer** becomes relevant water vapor permeability, choosing materials as permeable as possible. The ease of drying in the envelope layer should be considered. Materials should also be chosen that have little capacity to store water, both liquid and vapor. If water content variation in the envelope is low, variation of the thermal transmittance will also be small and the value of calculation will be more simulate in these cases to the value that would possibly behave in reality.

It is recalled that these recommendations have their scope for the climatic situation of A Coruña, with the north orientation and in this type of facade with these materials that have been considered. There is a need for more research that could lead to more predictions.

VIII

CONCLUSIONES

La realización de esta Tesis Doctoral ha contribuido a dar respuesta a todas las preguntas planteadas inicialmente en la investigación. Durante los capítulos precedentes, **se ha procedido al análisis higrotérmico por primera vez** de esta tipología constructiva de fachada ventilada norte de granito para la clasificación climática Köppen Geiger Csb, (A Coruña, España), clima templado y con grandes precipitaciones. Si bien hay estudios en otras clasificaciones climáticas y también de esta, este binomio es solamente característico del territorio analizado.

Esta tesis ha sido capaz de dar respuesta al **objetivo general**, es decir, de demostrar si la fachada ventilada norte y clima Csb se comportaba desde el punto de vista higrotérmico en la realidad tal y como se había predicho en un inicio. En este sentido es de destacar que si bien de la teoría y el cálculo higrotérmico se han obtenido resultados similares a la monitorización, sin embargo, se ha detectado que este sistema constructivo no está reflejado adecuadamente en el Código Técnico de la Edificación (C.T.E.). Si para el diseño se sigue el procedimiento prestacional descrito, se constatan valores y comportamientos alejados a lo indicado previamente y se obtienen soluciones confusas e incongruentes.

El actual C.T.E. español, por tanto, no ayuda a una adecuada prescripción técnica desde el punto de vista higrotérmico de la fachada ventilada norte en este clima. Se debería replantear un nuevo procedimiento legislativo con la incorporación de otros parámetros ambientales en este caso de riesgo hídrico. Además también se hace necesario el limitar y/o proponer rangos de valores de caracterización higrotérmica de los materiales utilizados en el sistema constructivo, tal y como en algunas normativas europeas ya sucede.

La contribución de esta tesis doctoral presenta una puerta abierta hacia la **innovación** para el desarrollo de un procedimiento más riguroso en la prescripción de fachadas según riesgos hídricos objetivables, del diseño de nuevos sistemas constructivos y/o materiales que puedan ser sustituidos por los actuales y que mejoren el comportamiento higrotérmico. La evaluación

de la aportación de la humedad en relación a su comportamiento energético, debe ser relevante y coherente.

VIII.1 CONCLUSIONES GENERALES

Complementariamente al objetivo general indicado, también se ha respondido a las preguntas de investigación planteadas al inicio. La **primera pregunta de investigación** cuestionaba si **en el sistema constructivo de fachada ventilada analizada había una desviación entre el valor de transmitancia térmica teórica o de cálculo (U_T) y la transmitancia térmica real (U_R)**, obtenida a partir de medidas in-situ.

Los resultados hallados demostraron **que existen diferencias mayores de un 15%** en porcentaje entre los distintos valores de transmitancia térmica, el calculado y el monitorizado. Los datos in-situ obtenidos difirieron de los valores calculados en un 4% y un 16,8%. Fue dificultosa la recogida y el procedimiento de la medida. Los análisis de simulación numérica mostraron que al menos en la mitad del año y mensualmente, debido al clima localizado, advierten valores superiores a los valores estáticos calculados, incluso incorporando la humedad en los materiales. El valor monitorizado in-situ y el obtenido en el mes de febrero por software Wufi Pro 5.3 apenas difirieron, por lo que la simulación se convierte en una herramienta importante para la predicción del comportamiento higrotérmico real.

En este sentido, y para este clima, la forma del uso del local y las cargas hídricas ambientales son de relevancia en la variabilidad de la densidad de tasa de flujo de calor y como consecuencia para la transmitancia térmica.

La **segunda pregunta de investigación**, cuestionaba si, **para A Coruña, Galicia (clima clasificado Köppen Geiger: Csb), había un aumento del valor de U_R en relación a otros climas debido a la humedad**. Es decir, en el caso concreto analizado, si hubiese una desviación de los valores de transmitancia térmica, pudiera ser debido a la humedad.

Se pudo comprobar con los cálculos que la conductividad térmica de los materiales componentes del cerramiento empeora con la humedad. La transmitancia térmica obtenida por materiales sometidos a un 80% de humedad relativa incrementó en un 4% el valor de la transmitancia térmica en seco. Sometiendo en el programa de simulación numérica el mismo tipo de cerramiento para clasificaciones climáticas diferentes, se pudo comprobar una diferencia de un 10% menor de transmitancia térmica en Madrid con respecto a la de A Coruña. Estas variaciones se correlacionaban con mayor o menor cantidad de lluvia y/o humedad en la clasificación climática.

En el análisis numérico de simulación de la fachada ventilada de granito en A Coruña se comprobó también que el valor U mensual más desfavorable obtenido del mes de invierno con lluvias fue un 44% más desfavorable que el mes de julio, mes más favorable.

La **última pregunta de investigación** cuestionaba si **el parámetro de la humedad ambiental es uno de los más relevantes para determinar el comportamiento higrotérmico del cerramiento para este clima**.

Para responder a esta pregunta, se realizaron 62 análisis de sensibilidad variando diferentes parámetros, organizados según características ambientales, de propiedades de materiales del sistema constructivo y condiciones de contorno. Además en los ensayos de verificación y

contraste se analizaron las posibles relaciones existentes entre la densidad de tasa de flujo de calor obtenida y los parámetros de humedad relativa y temperatura.

En los análisis numéricos de simulación se encontraron correlaciones de incremento de transmitancia térmica con todos los parámetros en los que influyen la humedad, tanto en el **ambiente** WDR, HR, T; como en la **respuesta del material**: conductividad térmica λ , coeficiente de resistencia al vapor de agua μ , curva de sorción **A**, densidad. En cuanto a la **respuesta del sistema**: buffer térmico, buffer hídrico no han sido motivos de estudio para predecir el comportamiento higrotérmico.

Con respecto a las pruebas de análisis de regresión lineal, se pudo comprobar que el parámetro dependiente de densidad de tasa de flujo de calor interior de la fachada ventilada de granito, puede ser explicable en segundo orden por la humedad relativa en un rango variable que dependía del ensayo utilizado y del clima que acontecía.

VIII.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Para poder dar respuesta a las preguntas de investigación anteriores, se establecieron los siguientes **objetivos específicos** que durante los capítulos precedentes concluyeron en aportaciones originales. A continuación se enumeran estos objetivos específicos.

1) Se ha recogido el conocimiento existente y analizado la normativa nacional e internacional relativa a la fachada ventilada de granito y el estado del arte de esta técnica constructiva

- 1.1 Se ha recopilado bibliográficamente los factores intervinientes en el comportamiento higrotérmico de una fachada
- 1.2 Se ha analizado crítica y comparativamente las diferentes normativas internacionales en cuanto a las exigencias de cumplimiento de las prestaciones higrotérmicas para la fachada
- 1.3 Se ha descrito el estado de la cuestión del comportamiento higrotérmico y energético de una fachada ventilada

2) Se han elegido y descrito los procedimientos para la evaluación del comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada de granito

- 2.1 Se ha descrito el método para la obtención de datos in-situ mediante monitorización
- 2.2 Se ha descrito el método para el análisis numérico de simulación
- 2.3 Se ha descrito el procedimiento de análisis de datos y comparación de los mismos

3) Se ha monitorizado el comportamiento higrotérmico del sistema constructivo de la fachada ventilada de granito con localización y orientación concreta

- 3.1 Se ha descrito el clima recogido en la localización de A Coruña, y en relación a los valores normales de A Coruña
- 3.2 Se ha conocido y cuantificado mediante la monitorización, la exposición hídrica-ambiental y la densidad de tasa de flujo de calor de la fachada ventilada real elegida
- 3.3 Se ha correlacionado la exposición hídrica-ambiental con el comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor y el conocimiento de la transmitancia térmica

4) Mediante análisis de simulación numérica se ha estimado la variabilidad e influencia de los parámetros materiales, de diseño y ambientales sobre el comportamiento higrotérmico de la fachada ventilada de granito

- 4.1 Se han identificado los parámetros relativamente sensibles
- 4.2 Se ha evaluado, mediante análisis de sensibilidad, los efectos producidos por los cambios realizados sobre el sistema de cerramiento o sus condiciones de entorno
- 4.3 Se ha analizado el proceso de mojado-secado de la fachada ventilada a lo largo del tiempo

5) Se ha verificado y comparado los resultados térmicos e hídricos obtenidos según los métodos utilizados

5.1 Se ha desarrollado un conjunto de pruebas de verificación y contraste alternativas que diesen respuesta y que argumentasen los resultados obtenidos

5.2 Se ha evaluado la validez de los resultados obtenidos en la monitorización higrotérmica

5.3 Se han confrontado los valores de cuantificación hídrica y de la transmitancia térmica de la fachada ventilada según los diferentes métodos utilizados y la simulación

6) Se ha definido el comportamiento higrotérmico característico y establecido recomendaciones

6.1 Se ha descrito el comportamiento ambiental e higrotérmico característico observado en la fachada ventilada

6.2 Se han explicado y discutido los hallazgos más relevantes en relación a los aspectos hídricos y térmicos

6.3 Se han establecido unas recomendaciones a partir de la comparación de los resultados y los hallazgos encontrados en el comportamiento higrotérmico

En definitiva, este trabajo ha realizado un estudio detallado para conocer el comportamiento higrotérmico de una fachada ventilada de granito orientada a Norte en el clima de A Coruña (Csb).

VIII.3 RECOMENDACIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Finalmente y como remate final de toda esta investigación se considera proponer una serie de recomendaciones organizadas en tres ámbitos y que se han incluido a continuación.

1. Diseño del cerramiento en la clasificación climática Köppen Geiger Csb

En el capítulo VII.3.2 se enumeraron una serie de recomendaciones para el prescriptor en el proceso de diseño. Aun así se ha considerado relevante hacer mención nuevamente en la adecuada elección de ciertas **propiedades de los materiales** de construcción, pues estas son determinantes para la velocidad de secado del muro y como consecuencia para una retención y menor contenido de agua. Se hacen comentarios siguientes según las propiedades:

Conductividad térmica λ [W/mK]: Es importante este parámetro para predecir el comportamiento en este tipo de climas tan húmedos. Se recomienda materiales que tengan un valor de λ muy parecido entre su estado seco y su estado húmedo. Nos permitirá controlar mejor el comportamiento frente al agua, ya que el rango de variación se reduciría y como consecuencia, la variación del valor de resistencia térmica sería menor. Si no se tiene esto en consideración, la variación podría llegar a ser relevante. Esta limitación, considerada importante tampoco se advierte de forma explícita en el actual Código Técnico de la Edificación

Coefficiente de resistencia al vapor de agua μ [m]: Se aconseja elegir materiales que tengan un bajo valor de μ porque serán más permeables al paso del vapor de agua. En el ejemplo del caso estudiado de poliuretano este parámetro varía entre 13 y 320. El aumento del valor puede hacer llegar a comportarse como una barrera al paso de vapor de agua. Un valor alto provoca que el muro solo pueda secarse por uno de los lados. El caso de la lana de roca o la lana de vidrio es muy diferente porque el valor de μ es muy bajo 1, 2 o 5. Permite que el muro pueda respirar, es decir, que el vapor de agua pueda moverse fácilmente en cualquiera de los sentidos, es decir, o hacia el interior, o hacia el exterior. En este caso es de resaltar la incorporación de **láminas inteligentes** en los detalles constructivos de fachada para permitir la transpirabilidad de los elementos, variando la resistencia al paso del flujo de vapor de agua para optimizar el comportamiento según las circunstancias ambientales.

Contenido de humedad crítica [-]: Este parámetro es de especial relevancia para el material inmediatamente en contacto con el ambiente exterior y la lluvia. Es una propiedad para observar la cantidad de agua máxima que puede admitir un material. En la elección de diseño, éste deberá ser lo más bajo posible. En el caso particular que ha sucedido en la fachada ventilada, el agua que admite la hoja exterior de granito será transmitida al entorno inmediato, o sea, hacia el exterior y/o hacia la cámara. La alta humedad relativa ambiental exterior provoca que este material sea la fuente de la elevación del contenido de humedad en la cámara de aire.

2. Mejora de la normativa del Código Técnico de la Edificación C.T.E.

Se observa necesario el desarrollo de un nuevo procedimiento y/o modificación del Código Técnico de la Edificación C.T.E., en concreto en su **apartado de salubridad DB HS-1**. El procedimiento debería considerar adecuadamente las cargas hídricas entendidas como un riesgo para el cerramiento y empeoramiento de las condiciones energéticas. Se propone que pudiese existir un tipo de cálculo similar al utilizado en el diseño estructural y hacer más vinculante el apartado de **ahorro de energía DB HE-1** con el apartado hídrico en este tipo de climas.

3. Homogeneización de ensayos y elaboración de base de datos de materiales, así como de climas para el acceso profesional/público

Las herramientas de software se manifiestan muy útiles por cuanto pueden predecir el comportamiento higrotérmico, ya que se aproximan al comportamiento real. Un motivo de la calidad de los resultados obtenidos se debe, en esencia, no sólo al modelo numérico sino también a los datos incorporados para el cálculo. Si estos datos son fiables, el resultado tendrá mayor validez. Es necesario, por tanto, la recogida de datos higrotérmicos fiables de diferentes materiales de construcción utilizados para los cálculos higrotérmicos, incluso por países y puesta a disposición de prescriptores y, en general, de toda la comunidad vinculada al mundo de la construcción.

Futuras líneas de investigación

Finalmente se sugieren futuras líneas de investigación que han sido descubiertas tras la investigación llevada a cabo a partir de esta tesis doctoral y que son:

A nivel nacional:

En el área de la física de las construcciones y concretamente en el ámbito de la higrotérmia se propone que se realicen más estudios pormenorizados de cerramientos. Es preciso realizar más estudios higrotérmicos cuantificables de monitorización y simulación, que adviertan lo adecuado de este sistema constructivo de fachada ventilada en los distintos climas de España. El conocimiento más exhaustivo y preciso de las implicaciones del clima en el comportamiento es de gran valor para mejorar la predicción y optimización en el diseño. Por otra parte los resultados obtenidos de los edificios monitorizados facilitan también validar las herramientas de simulación y proponer estándares de mayor calidad.

Teniendo en cuenta la importancia que la energía tendrá próximamente para la edificación se sugiere se realicen más estudios de cuantificación de densidad de tasa de flujo de calor para los cerramientos

La realización de estudios del comportamiento de la densidad de tasa de flujo de calor, no sólo en este tipo de cerramientos sino también para otras tipologías, es muy conveniente puesto que es un parámetro más preciso para la evaluación de las pérdidas de energía. La contribución de la humedad en la variación de la pérdida de energía se ha manifestado relevante en este tipo de clima. La comparación de estudios en diferentes climas puede ayudar

a evaluar con más precisión y coherencia el consumo en los edificios para actuar sobre la prescripción y el diseño de nuevos cerramientos más eficientes energéticamente.

En el área de desarrollo de métodos se propone que se elaboren y/o redefinan procedimientos para la normativa y legislación, concretamente en el ámbito hídrico

La normativa vigente del Código Técnico de la Edificación C.T.E., en los aspectos relativos a la humedad en los cerramientos es prestacional. Se basa en una serie de asunciones que no son coherentes con el comportamiento que se ha manifestado en este tipo de clima. En la actualidad existen deficientes decisiones para determinar las solicitudes hídricas e inadecuadas categorizaciones. Además la influencia hídrica ambiental influye en el comportamiento energético del cerramiento. Se podría plantear un apartado de cálculo de riesgo hídrico, así como de pautas definidas por rangos de variables de materiales y sistema de cerramiento y vincular esta decisión a un rango de rendimiento energético.

A nivel internacional:

También en el área de física de las construcciones y en el ámbito de la higrotérmia, se sugiere que se realicen más análisis comparando distintos tipos de cerramientos utilizados según una misma clasificación climática Köppen Geiger

Se trata de mostrar los sistemas constructivos utilizados en las localizaciones clasificadas con el mismo tipo de clima para, con todas las tipologías, y proponer el desarrollo y diseño de nuevos sistemas constructivos optimizados energéticamente y desde el punto de vista de la humedad.

En el área de gestión de información y conocimiento se observa necesaria una biblioteca internacional virtual de bases de datos de la construcción tanto para climas como para caracterización higrotérmicas de los materiales.

Se necesitaría una uniformización y accesibilidad de los datos climáticos y de los materiales. Existe en la actualidad una gran dificultad ya manifestada anteriormente para encontrar información de calidad. Traducir las investigaciones de caracterizaciones higrotérmicas de los materiales sería de gran utilidad para que las simulaciones puedan realizarse con la mayor veracidad posible.

En el área de ingeniería y concretamente en el ámbito de instrumentación y medida se propone el desarrollo de protocolos de monitorización de edificios, no sólo la definición de tipos de equipos y precisión, sino también de su colocación, puesta en funcionamiento, procedimiento de toma de datos y tratamiento de los mismos.

Durante la investigación se advirtió dificultades para la elección de un protocolo, si bien existen normas, decisiones de equipos y medidas, tratamientos de datos, etc no son abordados con rigor. Para la comparación de resultados de monitorizaciones in situ de las edificaciones bajo un mismo protocolo sería de gran ayuda. Esto es sobre todo muy relevante para la recogida de datos de la densidad de densidad de tasa de flujo de calor y como consecuencia para la cuantificación del consumo energético.

VIII

CONCLUSIONS

The central aim to this thesis was to answer all questions raised initially in the research. During previous chapters, hygrothermal analysis of an open-joint ventilated granite façade for the climatic classification Köppen Geiger Csb, (A Coruña, Spain) was carried out for the first time, in a warm climate with high rainfalls. Although there are studies in other climatic classifications, this binomial is only characteristic of the region analyzed.

This thesis has been able to answer to the general objective, that is, to demonstrate if the north ventilated façade and Csb climate behaved from the hygrothermal point of view in reality as predicted at first. In this sense, it is noteworthy that, although hygrothermal theory and calculation have obtained results similar to monitoring, however, it has been detected that this construction system is not adequately reflected in Spanish Building Code (C.T.E.). If the described performance procedure is followed for the design, values and behaviors are observed that are remote from the previously indicated and confusing solutions are obtained.

The current Spanish C.T.E., therefore, does not help an adequate technical prescription from the hygrothermal point of view of an open-joint ventilated north façade in this climate. A new legislative procedure should be reconsidered with the addition of other environmental parameters in this case of moisture risk. In addition, it is also necessary to limit and / or propose ranges of hygrothermal characterization values of the materials used in the construction system, as some European Regulations already do.

The contribution of this doctoral thesis presents an open door to innovation for the development of a more rigorous procedure in the prescription of façades according to objective moisture risks, the design of new construction systems and / or materials that can be replaced by the current ones and that hygrothermal behavior. The assessment of the contribution of moisture in relation to its energy behavior must be relevant and coherent.

VIII.1 GENERAL CONCLUSIONS

In addition to the general objective mentioned, research questions raised at the beginning have also been answered. The **first research question** raised whether there was a **deviation between theoretical thermal transmittance value (U_T) and real thermal transmittance (U_R)**, obtained from on-site measurements in the ventilated facade system analyzed.

Findings showed that there **are differences greater than 15 in percentage** between the different values of thermal transmittance, calculated and monitored. In-situ data obtained differed from the calculated values by 4% and 16,8%. Data acquisition and measurement procedure was difficult. Numerical simulation results showed that at least in the middle of the year and monthly, due to the climate, values were higher than calculated static values, even incorporating the humidity in materials. In-situ monitored value and obtained in the month of February by software Wufi Pro 5.3 value hardly differed. That is why simulation becomes an important tool for the prediction of the real hygrothermal behavior.

In this sense, and for this climate, the form of the use of the local and the environmental moisture loads are of relevance in the variability of the density of heat flow rate and as a consequence for thermal transmittance.

The second research question asked whether, for A Coruña, Galicia (climate classified Köppen Geiger: Csb), there was an increase in the value of U_R relative to other climates due to humidity. That is, in the particular case analyzed, if there were a deviation from the values of thermal transmittance, it could be due to humidity and moisture.

It was verified by calculations that thermal conductivity of the component materials of the envelope worsens with moisture. Thermal transmittance obtained by materials subjected to 80% relative humidity increased dry transmittance value by 4%. By submitting the same type of envelope in the numerical simulation program Wufi Pro 5.3 for different climatic classifications, a difference of 10% lower in thermal transmittance in Madrid than in A Coruña could be verified. These variations were correlated with greater or lesser amount of rain and / or humidity in the climatic classification.

In the numerical simulation analysis of the open-joint ventilated granite façade in A Coruña, it was also verified that the most unfavorable monthly U value obtained during the winter months with rainfall was 44% more unfavorable than the month of July, the most favorable month.

Last research question posed if **environmental moisture variable is one of the most relevant to determine the hygrothermal behavior of this façade for this climate.**

To answer this question, 62 sensitivity analyzes were performed varying different parameters, organized according to environmental characteristics, material properties of construction system and boundary conditions. Furthermore, in the verification and contrast tests, the possible relationships between the obtained heat flux density and the relative humidity and temperature parameters were assessed.

In the numerical simulation were found correlations of increase of thermal transmittance with all parameters in which they influence humidity, WDR, HR, T; as in the response of the material: thermal conductivity λ , water vapor resistance coefficient μ , sorption curve A, density. As for the system response: thermal buffer, moisture buffer have not been study here to predict hygrothermal behavior.

With respect to linear regression analysis tests, it was checked that parameter dependent of interior heat flow rate of the ventilated façade of granite, can be explained in second order by the relative humidity in a variable range that depended of the test used and the weather that was happening.

VIII.2 SPECIFIC CONCLUSIONS

In order to answer previous research questions, the following specific objectives were established during previous chapters and ended up in original contributions. These specific objectives are listed below.

Para poder dar respuesta a las preguntas de investigación anteriores, se establecieron los siguientes **objetivos específicos** que durante los capítulos precedentes concluyeron en aportaciones originales. A continuación se enumeran estos objetivos específicos.

1) Existing knowledge and analyzing national and international regulations regarding open-joint ventilated façade and the state of the art of this constructive technique has been collected

- 1.1 Factors involved in the hygrothermal behavior of a façade have been compiled
- 1.2 Different international regulations in terms of compliance of hygrothermal performance for a façade have been analyzed critically and comparatively
- 1.3 State of art of hygrothermal and energetic behavior of an open-joint ventilated façade has been described

2) Procedures for the assessment of hygrothermal behavior has been chosen and described

- 2.1 In-situ data collection through monitoring method has been elaborated
- 2.2 Numerical simulation analysis method has been stated
- 2.3 Data process analysis and data comparison has been specified

3) Hygrothermal behavior of constructive system of open-joint ventilated granite façade with concrete location and orientation has been monitored

- 3.1 Climate collected in the location of A Coruña, and in relation to the normal values of A Coruña has been described
- 3.2 Through monitoring, water-environmental exposure and density of the heat flow rate of real ventilated façade chosen has been known and quantified
- 3.3 Moisture-environmental exposure with behavior of the heat flow rate and knowledge of the thermal transmittance has been correlated

4) Using numerical simulation analysis the variability and influence of material, design and environmental parameters on the hygrothermal behavior of an open-joint ventilated granite façade has been estimated

- 4.1 Relatively sensitive parameters has been identified
- 4.2 Through sensitivity analysis, effects produced by changes made to the envelope system or its boundary conditions has been evaluated
- 4.3 Wet and drying processes of an open-joint ventilated façade over time has been analyzed

5) Thermal, hygric and hydric results obtained according to methods used (monitoring and simulation) have been verified and compared

- 5.1 A set of alternative verification and contrast tests have been developed
- 5.2 Results obtained in the hygrothermal monitoring have been assessed validity
- 5.3 Values of moisture quantification and thermal transmittance of an open-joint ventilated façade according to different methods have been confronted

6) Characteristic hygrothermal behavior and recommendations have been defined

- 6.1 Characteristic hygrothermal behavior observed in an open-joint ventilated façade have been described
- 6.2 Relevant findings in relation to hygric and thermal aspects have been explained and discussed
- 6.3 Recommendations about hygrothermal behavior based on the comparison of results and findings have been developed

In short, in this work has been explained hygrothermal behavior of an open-joint ventilated façade of granite oriented to the North in the climate of Galicia.

VIII.3 FINAL RECOMMENDATIONS AND NEW FUTURE TRENDS

Finally, and as an end of all this research, a series of recommendations, organized in three areas, are considered to propose that have been included below.

1. Design of the envelope in the climatic classification Köppen Geiger Csb

Chapter VII.3.2 listed a number of recommendations for the prescriber in the design process. Even so it has been considered relevant to mention again in the proper choice of certain properties of building materials, as these are determinants for the drying velocity of the wall and as a consequence for a retention and lower water content. The following comments are made according to the properties:

Thermal conductivity lambda [λ]: This parameter is important to predict the behavior in this type of wet climates. Materials with a lambda value that is very similar between dry state and wet state are recommended. It will allow us to better control the behavior against water, since the range of variation would be reduced and as a consequence, the variation of the thermal resistance value would be smaller. If this is not taken into account, the variation could become relevant. This limitation, considered important is also not explicitly stated in the current Spanish Building Code C.T.E.

Resistance to water vapor coefficient [μ]: It is advisable to choose materials that have a low value of μ because they will be more permeable to the passage of water vapor. In the example of the studied case of polyurethane this parameter varies between 13 and 320. The increase of the value can make to behave as a barrier to the passage of water vapor. A high value causes the wall to dry only on one side. The case of rock wool or glass wool is very different because the value of μ is very low 1, 2 or 5. It allows the wall to breathe, ie that water vapor can move easily in any of the ways, that is, or inward, or outward. In this case it is important to highlight the incorporation of smart sheets in the facade construction details to allow the breathability of the elements, varying the resistance to the passage of the water vapor flow to optimize the behavior according to the environmental circumstances.

Critical moisture content [-]. This parameter is of special relevance for the material immediately in contact with the outside environment and the rain. It is a property to observe the maximum amount of water a material can support. In design choice, this should be as low as possible. In the particular case that has occurred in the ventilated façade, the water that supports the outer granite sheet will be transmitted to the immediate environment, that is, to the outside and / or towards the cavity. The high external relative humidity causes this material to be the source of raising the moisture content in the air cavity.

1. Improvement of the regulations of Spanish Building Code C.T.E.

It is necessary to develop a new procedure and / or modification of Spanish Building Code C.T.E., specifically in its health conditions section DB HS-1. The process should adequately consider the moisture loads understood as a risk for the envelope and worsening of the

energy conditions. It is proposed that there could be a type of calculation similar to that used in the structural design and to make more binding the section of energy saving DB HE-1 with hidric section in this type of climates.

2. Homogenization of tests and preparation of database of materials, as well as climates for professional / public digital access

Software tools are very useful because they can predict the hygrothermal behavior, since they approximate a real behavior. One reason for the quality of the results obtained is essentially due not only to the numerical model but also to the data used for calculation. If these data are reliable, results will be validity. It is necessary, therefore, a collection of reliable hygrothermic data of different construction materials used for hygrothermal calculations. These data should include characteristics by country and making available to prescribers and, in general, the whole community linked to the construction world.

Future research trends

Finally, we suggest future research trends that have been discovered following the research carried out from this doctoral thesis and are:

At national level:

In the area of building physics and specifically in the field of hygrothermics, a more detailed study of envelopes to be carried out is proposed. It is necessary to carry out more quantifiable hygrothermal studies of monitoring and simulation, which note the adequacy of this constructive system of ventilated façade in the different climates of Spain. The most thorough and accurate knowledge of the implications of climate in the behavior is of great value to improve the prediction and optimization in the design. On the other hand, results obtained from the monitored buildings also facilitate the validation of the simulation tools and propose higher quality standards.

Taking into account the importance that energy will have for next steps, more studies of quantification of density of heat flow rate for envelopes is suggested to conduct

The study of the behavior of the density of heat flow rate, not only in this type of envelopes but also for other typologies, is very convenient since it is a more precise parameter for the evaluation of energy losses. Moisture contribution in the variation of energy loss has been shown to be relevant in this type of climate. Comparison of studies in different climates can help to more accurately and consistently evaluate the consumption in buildings to act on the prescription and design of new, more energy efficient envelopes.

In the area of implementing methods, procedures for standards and legislation, specifically in moisture area is proposed to develop and / or redefine

Current regulations as Spanish Building Code C.T.E., aspects related to the humidity in the envelopes are effective performance. It is based on a series of assumptions that are not consistent with the behavior that has manifested itself in this type of climate. At present there are poor decisions to determine the moisture stress and inadequate categorizations. In

addition moisture environment influences energetic behavior of the envelope. It could be considered a section of calculation of moisture risk, as well as guidelines defined by ranges of materials variables and closure system and link this decision to a range of energy performance.

On an international level:

Also in the area of building physics and in the field of hygrothermics, more analysis should be done comparing different types of envelopes used and according to the same climatic classification Köppen Geiger

It is a question of showing construction systems used in locations classified with the same type of climate to, with all the typologies, and to propose development and design of new constructive systems optimized energetically and from the humidity point of view.

In the area of information and knowledge management, a virtual international library of building databases is needed for both climates and hygrothermal characterization of materials.

It would require uniformity and accessibility of climatic data and materials. There is now a great difficulty already expressed previously to find quality information. To translate the research of hygrothermal characterization of the materials would be of great use so that the simulations can be carried out with the greatest veracity.

In engineering field and specifically in instrumentation and measurement, developing building monitoring protocols is proposed, not only the definition of types of equipment and precision, but also their placement, commissioning, data and managing.

During research, difficulties were noted for the choice of a protocol, although there are standards, equipment and measurement decisions, data processing, etc. are not rigorously addressed. Under the same protocol would be of great help for comparison of results of on-site monitoring. This is especially relevant for data collection of the density of heat flow rate and as a consequence for energy consumption quantification.

IX BIBLIOGRAFIA

- Aparicio-Fernández, C., Vivancos, J.-L., Ferrer-Gisbert, P. y Royo-Pastor, R. (2014). Energy performance of a ventilated façade by simulation with experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, 66(1-2), 563–570.
- Ashrae. (1999). Thermal and Moisture Control in Insulated Assemblies — Applications, (1994)
- Avellaneda, J. (1997). Facanes lleugeres ventilades. Criteris per al disseny constructiu. Papers de Construcció, Departamentos de Construccions Arquitectòniques I
- Avellaneda, J. y Paricio, I. (1999). Los revestimientos de piedra. Barcelona: Bisagra
- Balocco, C. (2002). A simple model to study ventilated facades energy performance. *Energy and Buildings*, 34(5), 469–475.
- Balocco, C. (2004). A non-dimensional analysis of a ventilated double façade energy performance. *Energy and Buildings*, 36(1), 35–40.
- Balocco, C., y Colombari, M. (2006). Thermal behaviour of interactive mechanically ventilated double glazed façade: Non-dimensional analysis. *Energy and Buildings*, 38(1), 1–7.
- Bannier, E., Cantavella, V., Silva, G., y Sarabia, E. (n.d.). Contribution of the Ventilated Façade, (1), 1–15.
- Barreira, E. Delgado, J. M. P. Q. y De Freitas, V. P. (2014). Wetting and Drying Kinetics of Building Materials. Drying and Wetting of Building Materials and Components. Building Pathology and Rehabilitation volume 4. Springer. New York. Pags 51-59
- Biddulph, P., Gori, V., Elwell, C. a., Scott, C., Rye, C., Lowe, R. y Oreszczyn, T. (2014). Inferring the thermal resistance and effective thermal mass of a wall using frequent temperature and heat flux measurements. *Energy and Buildings*, 78, 10–16.
- Bouza Cora, M. B. (2016). Contribución de entrada de agua en aplacados ventilados de piedra en función del diseño de las juntas verticales (Tesis Doctoral). Universidad de A Coruña, A Coruña.
- Cabeza, L.F., Castell, A., Medrano, M., Martorell, I., Pérez, G. y Fernández, I. (2010). Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction. *Energy and Buildings*, 42(5), 630–636.
- Ciampi, M., Leccese, F., & Tuoni, G. (2003). Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings. *Solar Energy*, 75(6), 491–502.
- Chartered Institution of Building Services Engineers (2015). Environmental Design Guide A.
- De Freitas, V. P. Abrantes V. y Crausse, P. (1996). Moisture Migration in Building Walls-Analysis of the Interface Phenomena. *Building and Environment*. (31) 2 Pags 99-108.
- De Freitas V.P. (2008). Humidade Ascensional. 1ªEd. Porto. FEUP Edições. 106 Pags.
- Delgado, J. M. P. Q., Barreira, E., Ramos, N. M. M. y de Freitas, V. P. (2013). Hygrothermal Numerical Simulation Tools Applied to Building Physics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 66 Pags

- Delghust, M., & Janssens, A. (n.d.). Retrofit cavity-wall insulation : performance analysis from in-situ measurements.
- Department of Communities and local Government. (2013). Building Regulations. Approved Document C: site preparation and resistance to contaminants and moisture. England. 52 Pags.
- Desmarais, G. (2008). Impact of adding insulation on the hygrothermal performance of leaky exterior wall assemblies. (Tesis de Master). Concordia University Montreal, Quebec, Canadá. 226 Pags.
- Desogus, G., Mura, S. y Ricciu, R. (2011). Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings*, 43(10), 2613–2620.
- DIN 4108-3:2014. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- Doran, S. (2000). Field investigations of the thermal performance of construction elements as built BRE Research Establishment Scotland, (November 2000), 93.
- Doran, S. y Carr, B. (2008). Thermal transmittance of walls of dwellings before and after application of cavity wall insulation, Report nº222077. Glasgow. BRE Research Establishment Scotland. 111 Pags
- Enedi. (2013). Comportamiento energético de una fachada ventilada en la zona climática del país vasco. Área Térmica del laboratorio de control de calidad en la edificación del gobierno vasco. 18 Pags
- European Organization of Technical Approvals. (2012). ETAG 034 Kits for external wall claddings. Part I: Ventilated claddings kits comprising cladding components and associated fixings. Part II: Cladding kits comprising cladding components, associated fixings, sub frame and possible insulation layer. Brussels. 127 Pags.
- Falk, J. (2014). *Rendered rainscreen walls*. Cavity ventilation rates, ventilation drying and moisture induced cladding deformation. (Tesis Doctoral) Lund University, Lund.
- Falk, J., Molnár, M. y Larsson, O. (2014). Investigation of a simple approach to predict rainscreen wall ventilation rates for hygrothermal simulation purposes. *Building and Environment*, 73, 88–96.
- Falk, J. y Sandin, K. (2013). Ventilated rainscreen cladding: Measurements of cavity air velocities, estimation of air change rates and evaluation of driving forces. *Building and Environment*, 59, 164–176.
- Falk, J. y Sandin, K. (2013). Ventilated rainscreen cladding: A study of the ventilation drying process. *Building and Environment*, 60, 173–184.
- Fernández Madrid, J. (1991). Humedades por capilaridad en la construcción. *Boletín académico* 14 págs. 17-21
- Ferreira T.M.D. y Corvacho M. H. P. (2007). Hygrothermal analysis on the use of internal insulation systems in portuguese residential buildings. *Building Simulation*. IBPSA. Beijing. Conference Paper.
- Ficco, G., Iannetta, F., Ianniello, E., D'Ambrosio Alfano, F.R. y Dell'Isola M. (2015). U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings. *Energy and Buildings*, 104(1), 108-121.

- Finch, G., Sc, B. A., Straube, J., & Ph, D. (2007). Hygrothermal Performance and Drying Potential of Wood Frame Rainscreen Walls in Vancouver ' s Coastal Climate.
- Finch, G., Straube, J. F., & Richmond, M. (2007). Field Performance of Spray Polyurethane Foam : The Role of Vapour Diffusion Control. *11th Canadian Conference on Building Science and Technology*.
- García Bescansa, Felipe (2016) Contribución de entrada de agua en aplacados ventilados de piedra en función del diseño de las juntas verticales (Tesis Doctoral). Universidad de A Coruña, A Coruña.
- Garden, K. (1963). Rain Penetration and his control. Canadian Building Digest nº40. National Research Council Canada. Institute for Research and Construction.
- G. Silva, V. Cantavella, A. R. García, E. Bou, A. Miralles, E. U. (n.d.). Estudio de la eficiencia energética de fachadas ventiladas cerámicas, (1), 1–15.
- Giancola, E. (2010). El comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Giancola, E., Sanjuan, C., Blanco, E. y Heras, M. R. (2012). Experimental assessment and modelling of the performance of an open joint ventilated façade during actual operating conditions in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 54, 363–375.
- Groat, L.N. y Wang D. (2002). Architectural Research Methods. 1ªEd. John Wiley & Sons. 389 Paginas
- Hens, H.S.L. (2012) Building Physics - Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises. Wilheim. John Wiley & Sons. 330 Pags
- ISO 9869.2014. Thermal insulation -- Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance -- Part 1: Heat flow meter method. Ginebra: International Organization for Standardization (08-2014). 36 Pags
- ISO 10051.1996. Thermal insulation -- Moisture effects on heat transfer -- Determination of thermal transmissivity of a moist material. Ginebra: International Organization for Standardization (04-1996). 19 Pags
- Jerman, M. y Černý, R. (2012). Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings* (53) 39-46.
- Karagiozis, A.N. y Künzel, H.M. (2008). The Effect of Air Cavity Convection on the Wetting and Drying Behavior of Wood-Frame Walls Using a Multi-Physics Approach. *Journal of ASTM International*. 6,(10)
- Kosmina, L. (2016). In-situ measurement of U-value. Guide to In-situ U-value measurement of walls in existing dwellings. BRE Research Establishment. 1-13.
- Kumaran, M. K. y Bomberg, M. T. (1993). Building Envelope and Environmental Control : Part 2 Estimating Performance of Thermal Insulation CFC-Free Foam Insulation.
- Künzel, H. M. (1995). Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One-and two-dimensional calculation using simple parameters. (Tesis Doctoral). IRB Verlag, Stuttgart.
- Künzel, H. M. y Kiessl, K. (1997). Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. *International Journal of Heat Mass Transfer* 40(1) 159-167

- Künzel, H. M., Karagiozis, A. N. y Kehrner, M. (2008). Assessing the benefits of cavity ventilation by hygrothermal simulation, 3(1), 17–20.
- Künzel, H. M., Holm A. H., Krus, M. (2008). Hygrothermal properties and behaviour of concrete. WTA-Almanach. 161-181.
- Lakatos, A. (2012). Investigation of water sorption properties of different insulating materials, 1827–1831. Advanced Research in Scientific Areas. December, 3, (7)
- Lepage R., Schumacher, C. y Lukachko, A. (2013). Moisture Management for High R-Value Walls, Building Science Corporation, U.S. Department of Energy: Energy Efficiency & Renewable Energy, Building Technologies Office
- López, F. P., Jensen, R. L., Heiselberg, P. y Ruiz de Adana Santiago, M. (2012). Experimental analysis and model validation of an opaque ventilated facade. *Building and Environment*, 56, 265–275.
- López Rivadulla, FJ. (2011). *Estudio transversal de la colonización biológica en fachadas ventiladas de granito en Galicia*. (Tesis doctoral). Universidade da Coruña, A Coruña.
- Marinosci, C. (2011). *Dynamic Thermal performance of building components and application to the experimental and theoretical analysis of a ventilated façade*. (Tesis Doctoral). Università de Bologna, Bologna.
- Marinosci, C., Strachan, P. A., Semprini, G. y Morini, G. L. (2011). Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen façade building. *Energy and Buildings*, 43(4), 853–863.
- Marinosci, C., Semprini, G. y Morini, G. L. (2014). Experimental analysis of the summer thermal performances of a naturally ventilated rainscreen façade building. *Energy and Buildings*, 72, 280–287.
- McCabe, S., Brimblecombe, P., Smith, B. J., McAllister, D., Srinivasan, S. y Basheer, P. A. M. (2013). The use and meanings of “time of wetness” in understanding building stone decay. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 46, 469–476.
- Millán, A. J. A., Gómez, I., Odriozola, M., Campos, A. y Apaolaza, A. (2010). Rendimiento energético de los cerramientos sometidos a variaciones higrotérmicas evaluation of the influence of hygrothermal variations on the energy efficiency of the building envelopes, 53–62.
- Monjó Carrió, J., Adell Argiles J.M. y Del Aguila García A. (2003). Tratado de Construcción. Fachadas y cubiertas. Madrid. Ed. Munillalera. 420 Pags
- Monjó Carrió, J. (1999). Humedades en fachadas. Tratado de rehabilitación, Patología y técnicas de intervención : fachadas y cubiertas, (4) 55-76
- Neno Pascoa, L. S. (2012). Drying index as an in-service parameter of renders applied on exterior facades (Tesis de Master). Instituto Politécnico de Lisboa. Lisboa
- Nore, K. (2009). Hygrothermal performance of ventilated wooden cladding. (Tesis doctoral). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Pardal C, Paricio I. (2006). La fachada ventilada y ligera. 1ªEd. Barcelona. Bisagra. 102 Pags
- Peci López, F. (2012). Numerical and experimental analysis of the energy saving and potential of ventilation of opaque ventilated façades. (Tesis Doctoral). Universidad de Córdoba, Córdoba.

- Peci López, F. y Ruiz de Adana Santiago, M. (2015). Sensitivity study of an opaque ventilated façade in the winter season in different climate zones in Spain. *Renewable Energy*, 75, 524–533.
- Pérez Bella, J.M. (2012). Parametrización de la exposición a la humedad y de los ensayos de estanqueidad en cerramientos de edificación: Caracterización prestacional de su comportamiento higrotérmico. (Tesis Doctoral). Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- Pérez Bella, J.M., Domínguez-Hernández, J., Rodríguez-Soria B., del Coz-Díaz J. de J. y Cano-Suñén, E. (2013). Combined use of wind-driven rain and wind pressure to define water penetration risk into building façades: The Spanish case. *Building and Environment* 64, 46-56.
- Pérez Bella, J.M., Domínguez-Hernández, J. Cano-Suñén, E., del Coz-Díaz J. de J. y Martín-Rodríguez, A. (2014) Procedure for a detailed territorial assessment of wind-driven rain and driving-rain wind pressure and its implementation to three Spanish regions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 128, 76-89.
- Pisello, A. L., Cotana, F., Nicolini, A., & Buratti, C. (2014). Effect of dynamic characteristics of building envelope on thermal-energy performance in winter conditions : In field experiment, 80, 218–230.
- Politecnica, U. (2013). Doctoral School on Engineering Sciences Experimental and analytical assessment of vertical opaque envelopes : optimization in warm temperate climates.
- Real Decreto 314/2006. Código Técnico de la Edificación, C.T.E.. Madrid. 17 marzo 2006.
- Ramos, N. M. M., Barreira, E. Simoes, M. L. y Delgado J. M. P. Q. (2013). Probabilistic risk assesment applied to biological growth on external surfaces of ETICS. *Performance Simulation Association. Proceeding of BS 2013: 13TH Conference of the International BuildinG*. Chambery. Pags 2884-2889
- Rhree-Duverne, S. y Baker, P. (2013). Research into the thermal performance of traditional brick walls. *English Heritage Research Report*, 34 Pags.
- Rogass, H. y Fisher, U. (2000). Investigation of the drying process of moist building materials by means of heat flux density measurements. *Non-destructive Testing in Civil Engineering* 2000. 181-190.
- Rojo, A., Alonso, F.J. y Esbert, R.M. (2002). Propiedades hídricas de algunos granitos ornamentales de la península ibérica con distintos acabados superficiales: interpretación petrofísica. *Materiales de Construcción*. 53,(269). 61-72.
- Rye, C. (2011). The Spab Research Report 1. U-value Report. Society for the Protection Ancient Buildings. 34 Pags.
- Sánchez, M. N., Sanjuan, C., Suárez, M. J. y Heras, M. R. (2013). Experimental assessment of the performance of open joint ventilated façades with buoyancy-driven airflow. *Solar Energy*, 91, 131–144.
- Sánchez Ostiz Gutierrez, A. (1996). Fachadas. Cerramientos de edificios. 1ªEd, Madrid. CIE Dossat 2000. 906 Pags.
- Sanjuan, C., Suárez, M. J., Blanco, E., y Heras, M. del R. (2011). Development and experimental validation of a simulation model for open joint ventilated façades. *Energy and Buildings*, 43(12), 3446–3456.

- Sanjuan, C., Suárez, M. J., González, M., Pistono, J. y Blanco, E. (2011). Energy performance of an open-joint ventilated façade compared with a conventional sealed cavity façade. *Solar Energy*, 85(9), 1851–1863.
- Seferis, P., Strachan, P., Dimoudi, A. y Androutsopoulos, A. (2011). Investigation of the performance of a ventilated wall. *Energy and Buildings*, 43(9), 2167–2178.
- Simpson Y. (2010). Field evaluation of ventilation wetting and drying of rainscreen walls in coastal British Columbia. (Tesis de Master). Concordia University. Montreal.
- Spinu, M. (2012). DuPont Building Innovations VAPOR PERMEABLE OR IMPERMEABLE BUILDING, 1–10.
- Stazi, F., Tomassoni, F., Vegliò, A. y Di Perna, C. (2011). Experimental evaluation of ventilated walls with an external clay cladding. *Renewable Energy*, 36(12), 3373–3385.
- Stazi, F., Vegliò, A. y Di Perna, C. (2014). Experimental assessment of a zinc-titanium ventilated façade in a Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 69, 525–534.
- Sting Leal, A. S. (2011). Avaliação do comportamento higrotermico de revestimentos exteriores de fachadas devido á acção da chuva incidente. (Tesis de Master). Universidade do Porto. Porto. 170 Pags.
- Straube, J. y Finch, G. (2009). Report 0906: Ventilated wall claddings: review, field performance, and hygrothermal modeling. *Test*, 25. [www.buildingscience.com. 25Pags.]
- Suárez, M. J., Sanjuan, C., Gutiérrez, A. J., Pistono, J. y Blanco, E. (2012). Energy evaluation of an horizontal open joint ventilated façade. *Applied Thermal Engineering*, 37, 302–313.
- Sugo, H. O. y Page A. W. (2005). The study of heat flows in masonry walls in a thermal test building incorporating a window. *Qanadian Masonry Symposium, Banff, Alberta*, 11.
- Tanner, C. y Wakili K. G. (1998). EMPA, Schlussbericht Nr. 158740 “Wärmebrücken von hinterlüfteten Fassaden. Messungen, Berechnungen, Vergleiche.
- Tariku, F., Simpson, Y. y Iffa, E. (2015). Experimental investigation of the wetting and drying potentials of wood frame walls subjected to vapor diffusion and wind-driven rain loads. *Building and Environment*, 92, 368–379.
- TenWolde, A., Carll, C., y Malinauskas, V. (1995). Airflows and Moisture Conditions in Walls of Manufactured Homes. Airflow Performance of Building Envelopes, Components, and Systems, ASTM STP 1255 Mark P. Modera and Andrew K. Persily, Eds., Philadelphia. American Society for Testing and Materials. 137-155.
- Toman, J., Vimmrová, A., Černý, R. y Jan Toman, A. V. R. Cerny. (2009). Long-term on-site assessment of hygrothermal performance of interior thermal insulation system without water vapour barrier. *Energy and Buildings*, 41(1), 51–55.
- Torres, C. A. D. y Delgado, A. D. (2013). Thermodynamic Analysis of Ventiladed Façades under Operating Conditions in Southern Spain, (11), 132–138.
- Treschel, H.R. (1998). Moisture Control in Buildings, 1ª Ed., Philadelphia PA. American Society for Testing and Materials, manual series. 485 Pags

- UNE-EN-ISO 6946:2012. Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo. Madrid: Asociación Española de Normalización. (27-04-2012). 34 Pags
- UNE-EN-ISO 10456:2012. Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores termicos de declarados y diseño. (12-2012) 34 Pags.
- UNE-EN-ISO 13788:2012. Características higrotérmicas de los elementos y componentes de edificación. Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial. Métodos de cálculo. Madrid: Asociación Española de Normalización. (27-07-2016). 50 Pags
- UNE-EN-ISO 15026:2007. Comportamiento higrotérmico de componentes de edificios y elementos constructivos. Evaluación de la transferencia de humedad mediante simulación numérica. (Ratificada por AENOR en junio de 2010.) Madrid: Asociación Española de Normalización. (06-01-2010). 26 Pags

LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

LISTADO DE FIGURAS:

CAPÍTULO I

Figura I.1: Rúa Nova en Santiago de Compostela

Figura I.2: Métodos utilizados en la tesis

Figura I.3: Esquema conceptual de la tesis doctoral

CAPITULO II

Figura II.1: Mapa de la Clasificación mundial climática de Köppen Geiger. Revisión 2006

Figura II.2: Localización de los climas Csa y Csb con altas precipitaciones. (Sander y Wardell-Jonhson, 2012)

Figura II.3: Clasificación climática según el Código Técnico de la Edificación C.T.E.

Figura II.4: Evolución de la precipitación anual 1961-2014 (Fuente: Informe climático anual de Galicia 2014)

Figura II.5: Mapa de precipitación acumulada en el año 2014 (Informe climático anual de Galicia 2014) y diagrama ombrotérmico de A Coruña con datos con valores climáticos normales de temperatura °C en línea roja y precipitación mm en barras azules (1971-2000) de la estación de A Coruña AEMET

Figura II.6: Rosa de los vientos de A Coruña del periodo 1971-2000. (Fuente IDAE)

Figura II.7: Irradiancia global media en Europa 1983-2005 (Fuente: Eumetsat)

Figura II.8: Clases de higrometría interior y variación de la humedad interior en función de las clases de higrometría y la temperatura exterior. (UNE EN ISO 13788:2002)

Figura II.9: Clases climáticas definidas. (EN ISO 15026)

Figura II.10: Humedad relativa interior de diseño atendiendo a la media de temperatura exterior según el método simplificado. (ASHRAE 160P)

Figura II.11: Geometría de la molécula de agua y composición

Figura II.12: El fenómeno de capilaridad. (Freitas, 2008)

Figura II.13: Curva de presión capilar de diferentes materiales de construcción. (De Freitas, 2008)

Figura II.14: Cálculo gráfico de la ocurrencia de condensaciones. (Freitas, 2008)

Figura II.15: Vista esquemática de los mecanismos de humedad: almacenamiento, cambios de fase y transporte. (Treschel, 1989)

Figura II.16: Isotherma de sorción. Diagrama específico del almacenamiento de agua en función de la higroscopicidad del material. (Künzel, 1995)

Figura II.17: Gráfica del transporte de humedad en los poros capilares al incrementar la humedad (Künzel, 1995)

Figura II.18: Comportamientos de capilar libre y capilar ocluido (Fernández Madrid, 1991)

Figura II.19: Típica curva de sorción de mojado y secado (Hall&Allison, 2009)

Figura II.20: Perfiles de elevación capilar del agua en los diferentes granitos (Mosquera et al, 2000)

Figura II.21: Relación entre magnitudes físicas

Figura II.22: Curvas de sorción de tres tipos de yeso (Delgado J et al, 2013)

Figura II.23: Tipos de radiaciones que llegan a una superficie

Figura II.24: Parámetros de inercia térmica. Amortiguación b/a (*decrement factor*) y retardo térmico r (*time lag*)

Figura II.25: Posición típica de la barrera impermeable al vapor de agua según climas: 1º Climas fríos, barrera hacia el interior, 2º Climas calientes, barrera hacia el exterior. (Adaptado según DuPont Tyvek, 2006)

Figura II.26: Conceptos que definen la transpirabilidad “breathability”

Figura II.27: Gradación de la permeabilidad al vapor de agua y de la resistencia térmica para los materiales del cerramiento. Adaptado de CISBE Guide A: 2015

Figura II.28: Cerramiento de fachada ventilada de granito analizada

Figura II.29: Partes de una fachada ventilada (Ascer, 2010)

Figura II.30: Disposición de aislamiento y subestructura de aluminio y de madera en una fachada ventilada cerámica

Figura II.31: Espaciador térmico de plástico reforzado con fibra de vidrio para rainscreen walls

Figura II.32: Fuerzas que producen la penetración de la lluvia al interior de la cámara (Garden, 1963)

Figura II.33: Sección de junta en el acabado del aplacado exterior según norma DIN 4108-3:2014

Figura II.34: Tabla 2.5 Grado de impermeabilidad mínimo exigido a las fachadas y Figura 2.4 zonas pluviométricas de promedios en función del índice de promedio anual. (C.T.E. DB HS-1: 2013)

Figura II.35: Tabla 2.6 Grado de exposición al viento y figura 2.5 de zonas eólicas. (C.T.E. DB-HS-1, 2013)

Figura II.36: Esquema de clasificación del índice de riesgo de penetración de agua en las edificaciones atendiendo al WDR y WRWP (Perez-Bella et al, 2013)

Figura II.37: Índice del riesgo de penetración del agua en las fachadas de los edificios (RIWP) en Galicia (Pérez-Bella et al, 2014)

Figura II.38: Cerramiento de fachada ventilada de granito para el cálculo de la transmitancia térmica

Figura II.39: Presión de vapor exterior y de la cámara (suponiendo casi cerrada) obtenidos de los valores ambientales exteriores e interiores indicados en el DA DB HE-1

Figura II.40: Diferencia de presiones de vapor del exterior y de la cámara casi cerrada (Pv-Pvc) mensuales obtenidos del apéndice del procedimiento DA DB HE-1:2013

Figura II.41: Valores de grados día de calefacción HDD y transmitancia térmica, valor U máximo de muros en los países miembros de la Unión Europea

Figura II.42: Valor U exigido por los países según códigos nacionales y HDD de diversas áreas. Fuente Papadopoulos (2005) y Eurostat (2009).

Figura II.43: Zonas de exposición (1-2-3-4) a la lluvia batiente (*Wind Driven Rain*) en Gran Bretaña

Figura II.44: Muro tipo C: Cerramiento vertical de dos hojas y con relleno parcial de aislamiento. (Technical Booklet C)

Figura II.45: Índice de Scheffer CI de localizaciones españolas

Figura II.46: Monograma de categoría de exposición.

Figura II.47: Tipología de cerramientos rainscreen utilizados en Vancouver (Canadá) con R-22, denominados split insulation wall y exterior wall

Figura II.48: Clasificación climática para la determinación de los valores R máximos para EE.UU. (IECC, 2012)

Figura II.49: Diagrama de flujo para el control de la humedad en la edificación usando el estándar ASHRAE 160P

Figura II.50: Representación de los mecanismos de mojado y secado del cerramiento (Straube et al, 2009)

Figura II.51: Fachada ventilada de granito a ensayar: movimiento del agua líquida, movimiento del vapor de agua y transporte de vapor de agua

Figura II.52: Datos monitorizados de Temperatura y Humedad relativa del exterior y de la cámara de aire. (Finch, Sc, et al., 2007)

Figura II.53: Diferencia media de presión de vapor de agua. Valores positivos secado y valores negativos mojado (Finch, Sc, et al., 2007)

Figura II.54: Detalles de la fachada ventilada monitorizada. (Aparicio-Fernández et al., 2014)

Figura II.55: Densidad de flujos de calor recogidos en las dos células de test TR-1, TR-2 desde el 13 de noviembre del 2012 hasta el 8 de enero del 2013 (Pisello, 2014)

Figura II.56: Valor de transmitancia térmica de TR-1 y TR-2 obtenida de los datos in –situ de flujo de calor

Figura II.57: Valor de conductividad térmica en función del contenido de humedad de los diferentes aislamientos térmicos según EN ISO 10456:2012. (Aipex, 2016)

Figura II.58: Resultados en los ensayos de absorción de agua por inmersión [%] en volumen de contenido de agua y ensayo de absorción de agua por difusión de vapor [%] en volumen de agua (a largo plazo) UNE EN12088 (Aipex, 2016)

Figura II.59: Curva de adsorción y desorción del PUR y relación del contenido de humedad y la conductividad térmica del PUR (Lakatos, 2012)

Figura II.60: Posición de los sensores de flujo de calor para la obtención del flujo de calor latente

Figura II.61: Resultados de densidad de flujo de calor del lado caliente y del lado frío de un muro de hormigón poroso. Diferencia de la densidad de flujo de calor y densidad de flujo de masa de secado. (Rogass y Fisher, 2000)

Figura II.62: Procesos llevados a cabo por la humedad que envuelven cambios de fase en la edificación (Treschsel, 1995)

Figura II.63: Algunos ejemplos en los cuales los efectos de la humedad en la envolvente debe ser tenidos en cuenta (Treschsl, 1995)

Figura II.64 : Detalle del sistema de cerramiento ensayado y representación anual del valor U estacionario y dinámico para la fachada ventilada y no ventilada en San Sebastián. (Enedi, 2013)

Figura II.65: Signo y posición del sensor de flujo de calor en rojo. Valores de temperatura, radiación y flujo de calor (medido y simulado) para un día de verano de la fachada ventilada al sur en Almería. (Adaptado de Giancola et al., 2012)

Figura II.66: Signo y posición del sensor de flujo de calor en rojo. Valores de temperaturas y flujos de calor (medido y simulado) de la fachada ventilada sur para un día de invierno en Almería. (Adaptado de Giancola et al., 2012)

Figura II.67: Flujo de calor de una ventana en invierno (Sugo et al, 2005)

Figura II.68: Flujo de calor de un cerramiento vertical en invierno (Sugo et al, 2005)

Figura II.69: Signo y posición del sensor del flujo de calor. Flujo de calor con tres tipos de soluciones: poliuretano, lana de vidrio y sin aislamiento en fachada sur. (Adaptado de Cabeza et al, 2010)

Figura II.70: Signo y posición del sensor del flujo de calor. Tendencia de la temperatura exterior y de la densidad de flujo de calor de dos cerramientos en condiciones de verano. (Adaptado de Marinosci, 2011)

Figura II.71: Signo y posición del sensor del flujo de calor. Tendencia de la densidad de flujo de calor de la fachada ventilada en la superficie interior según diferentes orientaciones. (Adaptado de Marinosci, 2011)

Figura II.72: Signo y posición del sensor del flujo de calor. Comparación del flujo de calor en W/m² para diferentes espesores de la cámara en un día de invierno y un día de verano en la fachada ventilada sur representada. (Adaptado de Balocco, 2002)

Figura II.73: Signo y posición del sensor del flujo de calor. Sección constructiva de las situaciones energéticas supuestas cámara sellada y ventilada (OJVF) (Adaptado de Suárez et al., 2012)

Figura II.74: Flujo de calor en la fachada norte y sur con cámara ventilada OJVF y sin ventilar en los meses de invierno y verano. (Suarez et al., 2012)

CAPÍTULO III

Figura III.1: Interrelación entre la obtención de resultados reales y la teoría física

Figura III.2: Triangulo de disciplinas de conocimiento en el ámbito de la tesis

Figura III.3: Plano de localización del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña. Universidad de A Coruña. En recuadro rojo el edificio.

Figura III.4: Foto y plano de la fachada ventilada de análisis. En rojo la localización del dispositivo de medida en la cámara de aire y en el exterior

Figura III.5: Posición de los sensores exterior-cámara e interior de la fachada ventilada norte del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Figura III.6: Fachada interior analizada del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña 01/02/2016

Figura III.7: Fotos de termografía de las esquinas superiores del cerramiento analizado

Figura III.8: Fotos de termografía de la superficie inferior del cerramiento analizado

Figura III.9: Fachada exterior analizada del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña 01/02/2016

Figura III.10: Fotos de termografía de la parte del cerramiento exterior analizado

Figura III.11: Posición de los sensores en el alzado interior norte del salón de grados del edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de A Coruña

Figura III.12: Construcción de los sensores e instalación para la medición del flujo de calor. Guía del usuario HFS-3 y HFS-4 Omega.

Figura III.13: Posición de los sensores exterior-cámara e interior y sensores de densidad de tasa de flujo de calor de la fachada ventilada norte del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura en la segunda monitorización de febrero a marzo 2016

Figura III.14: Diagrama de flujo de la técnica de cálculo en la cual el software WUFI está basada (Künzel HM, 1995)

Figura III.15: Plano de conexiones del Datataker DT-85 con los sensores instalados

Figura III.16: Fotografía del muro interior del Salón de grados del edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de A Coruña donde se situarán los sensores.

Figura III.17: Foto del sensor de temperatura ambiental y humedad relativa exterior. Paso de cables hacia el interior del cerramiento

Figura III.18: Caja de recogida de datos con el datalogger en el interior. Detalle de colocación del sensor superficial de temperatura PT-100. Imagen del Datalogger.

Figura III.19: Posición de los sensores tipo tinytag que recogen temperatura y humedad relativa, uno en el exterior y otro en la cámara de aire. Fotografía tomada el 18 de febrero de 2016 en la fachada ventilada norte del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña.

Figura III.20: Disposición de los sensores de flujo de calor repartidos en la superficie interior

Figura III.21: Disposición del revestimiento de madera para la realización de la monitorización segunda

Figura III.22: Posición de los sensores exterior-cámara e interior y sensores de densidad de tasa de flujo de calor de la fachada ventilada norte del Edificio de Departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura en la tercera monitorización de enero a febrero 2017

Figura III.23: Alzado interior de la fachada ventilada de granito norte. Datos de temperatura superficial de granito en [°C] el 3 de febrero del 2017 obtenidas con termómetro infrarrojos. Posición de los sensores de densidad de tasa de flujo de calor HFS2 y HFS3.

Figura III.24: Prueba de pretest con todos los sensores en la misma posición

Figura III.25: Posición de los dos sensores de temperatura superficial (PT-100) en el pretest de contraste de la prueba realizada en enero y febrero del 2017

Figura III.26: Posición de los dos sensores de temperatura superficial (PT-100) y los dos sensores de densidad de tasa de flujo de calor (HFS2 y HFS3) en la prueba realizada en enero y febrero del 2017

Figura III.27: Diagrama de flujo de la técnica de cálculo en la cual está basada el software WUFI Pro 5.3 (Künzel, 1995)

Figura III.28: Menú desplegable de proyecto: posición de monitoreo. Wufi Pro 5.3

Figura III.29: Menú desplegable de proyecto: posición de monitoreo. Selección de materiales y sus propiedades en bases de datos. Wufi Pro 5.3

Figura III.30: Menú desplegable del programa Wufi Pro 5.3 donde se observa la elección en el proyecto del clima exterior.

Figura III.31: Menú desplegable de proyecto. Componente. Orientación, inclinación, altura. Wufi Pro 5.3

Figura III.32: Efecto de incrementar el periodo de monitoreo Duvener y Baker (2013)

CAPITULO IV

Figura IV.1: Temperatura media mensual exterior del año monitorizado al lado de la fachada ventilada de granito orientada al norte (discontinua) y valores normales de la localización de A Coruña (línea) (mayo 2008, abril 2009)

Figura IV.2: Temperatura exterior °C al lado de la fachada ventilada de granito orientada al norte durante el año de monitorización (mayo-2008, abril 2009)

Figura IV.3: Temperatura en la cámara (rojo) y temperatura de punto de rocío en la cámara (azul) en °C (eje vertical) durante mayo-2008 a abril 2009.

Figura IV.4: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de junio del 2008.

Figura IV.5: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de julio, agosto y septiembre del 2008.

Figura IV.6: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de septiembre del 2008.

Figura IV.7: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de octubre, noviembre y diciembre del 2008.

Figura IV.8: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de diciembre del 2008.

Figura IV.9: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de enero, febrero y marzo del 2009.

Figura IV.10: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de marzo del 2009.

Figura IV.11: Temperatura del exterior (rojo) y de la cámara (azul) en el mes de abril del 2009.

Figura IV.12: Posiciones del cerramiento de fachada ventilada de granito monitorizado. 1 ambiente exterior, 2 cámara de aire del cerramiento y 3 ambiente interior

Figura IV.13: Datos de temperatura ambiental en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior en °C del día de primavera 16/05/2008

Figura IV.14: Datos de temperatura ambiental en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior en °C del día de verano 01/08/2008

Figura IV.15: Datos de temperatura ambiental en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior en °C del día de otoño 01/11/2008

Figura IV.16: Datos de temperatura ambiental en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior en °C del día de invierno 01/02/2009

Figura IV.17: Temperatura ambiental en °C durante el mes de febrero del 2016 en la fachada, en la estación meteorológica de A Coruña y la estación de A Coruña aeropuerto

Figura IV.18: Temperatura interior y exterior desde el día 4 de febrero hasta el 17 de marzo del 2016

Figura IV.19: Temperatura interior, de la cámara y del exterior desde el día 19 de febrero hasta el 17 de marzo del 2016

Figura IV.20: Humedad relativa en % en A Coruña (azul) de mayo del 2008 a mayo 2009

Figura IV.21: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de junio del 2008.

Figura IV.22: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de julio, agosto y septiembre del 2008.

Figura IV.23: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de septiembre del 2008.

Figura IV.24: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de octubre, noviembre y diciembre del 2008.

Figura IV.25: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de diciembre del 2008.

Figura IV.26: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de enero, febrero y marzo del 2009.

Figura IV.27: Humedad relativa del exterior (azul) y de la cámara (verde) en el mes de marzo del 2009.

Figura IV.28: Humedad relativa del exterior (azul) en el mes de mayo del 2009.

Figura IV.29: Concentración de vapor de agua en la cámara en gr/m^3 en el ambiente exterior y la cámara durante el año de monitorización mayo 2008-abril 2009

Figura IV.30: Promedio de humedad absoluta en el ambiente exterior (azul) y la cámara ventilada (verde) en los meses del año monitorizados mayo 2008 a abril 2009

Figura IV.31: Humedad absoluta del ambiente exterior (azul) y de la cámara ventilada (verde) en octubre del 2008

Figura IV.32: Incremento porcentual de la H_{abs} de la cámara con respecto a la H_{abs} del ambiente exterior en todos los meses del año monitorizados, de mayo 2008 a abril 2009. En violeta incrementos positivos y en azul incrementos negativos.

Figura IV.33: Datos de humedad relativa ambiental en % en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior del día de primavera 16/05/2008

Figura IV.34: Datos de humedad relativa ambiental en % en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior del día de verano 01/08/2008

Figura IV.35: Datos de humedad relativa ambiental en % en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior del día de otoño 01/11/2008

Figura IV.36: Datos de humedad relativa ambiental en % en la posición 1 exterior, 2 cámara y 3 interior del día de invierno 01/02/2009

Figura IV.37: Presión de vapor de agua horaria (Pa) en el exterior P_{ve} (rojo), presión de vapor en la cámara de aire P_{vc} (azul) y presión de vapor en el interior P_{vi} (verde) durante el año de monitorización.

Figura IV.38: Presión de vapor en el exterior P_{ve} (rojo) y presión de vapor de saturación en el exterior $P_{vs,e}$ (gris discontinuo) durante el año de monitorización.

Figura IV.39: Presión de vapor en la cámara P_{vc} (violeta) y presión de vapor de saturación en el exterior $P_{vs,e}$ (negro discontinuo) durante el año de monitorización.

Figura IV.40: Presión de vapor en el interior P_{vi} (verde) y presión de vapor de saturación en el exterior $P_{vs,i}$ (verde discontinuo arriba) durante el año de monitorización.

Figura IV.41: Presión de vapor en el exterior, en la cámara y en el interior en el mes de junio del 2008 monitorizado.

Figura IV.42: Presión de vapor en el exterior, en la cámara y en el interior en el mes de octubre del 2008 monitorizado.

Figura IV.43: Movimiento del vapor de agua de mayor concentración hacia la menor concentración. Adaptado de DuPont Tyvek (2006).

Figura IV.44: Sentido del flujo de vapor de agua saliente al exterior (rojo) y entrante a la cámara (azul) y diferencia presión de vapor en el mes de junio de 2008

Figura IV.45: Sentido del flujo de vapor de agua saliente a la cámara (rojo) y entrante al ambiente interior (azul) y diferencia presión de vapor en el mes de junio de 2008

Figura IV.46: Porcentaje de horas en cada mes analizado de la diferencia de presión de vapor de agua $P_{ve} - P_{vc}$. En rojo movimiento de la cámara al exterior, en azul movimiento del exterior hacia la cámara

Figura IV.47: Porcentaje de horas en cada mes analizado de la diferencia de presión de vapor de agua $P_{vc} - P_{vi}$. En rojo movimiento de la cámara a la cámara, en azul movimiento del exterior hacia el interior.

Figura IV.48: Horas totales monitorizadas (7990h) del sentido de flujo de vapor de agua entre el exterior y la cámara ($P_{ve} - P_{vc}$) y entre la cámara y el interior ($P_{vc} - P_{vi}$). Mayo 2008 a abril 2009

Figura IV.49: Patrones definidos del sentido del flujo de difusión de vapor de agua en la fachada ventilada de granito orientada al norte entre el exterior y la cámara

Figura IV.50: Patrones definidos del sentido del flujo de difusión de vapor de agua en la fachada ventilada de granito orientada al norte entre el exterior y la cámara

Figura IV.51: Presión de vapor en el ambiente exterior, de la cámara y del interior en la monitorización del 19 al 17 de marzo del 2016

Figura IV.52: Valor y sentido del flujo de vapor de agua desde el 19 de febrero hasta el 17 de marzo del 2016. En rojo saliente de la cámara hacia el exterior y en azul entrante desde el exterior hacia la cámara.

Figura IV.53: Valor y sentido del flujo de vapor de agua desde el 19 de febrero hasta el 17 de marzo del 2016. En rojo saliente del interior hacia la cámara y en azul entrante desde la cámara hacia el interior.

Figura IV.54: Horas monitorizadas con sentido de flujo de vapor de agua entre el exterior y la cámara (Pve – Pvc) y entre la cámara y el interior (Pvc – Pvi). Días del 19 febrero al 17 marzo 2016

Figura IV.55: Número de horas del sentido de flujo de vapor de agua entre el exterior y la cámara y entre la cámara y el interior en los periodos monitorizados 18 febrero a 18 marzo 2009 y 2016

Figura IV.56: Posiciones de los sensores de flujo de calor y temperaturas superficiales en el cerramiento en el periodo primero y segundo (izquierda) y tercero (derecha)

Figura. IV.57: Temperaturas superficiales interiores en °C en la posición de los medidores de flujo de calor. Mediciones tomadas entre el 4 de febrero al 17 de marzo del 2016

Figura IV.58: Medias y desviación típica de las temperaturas superficiales en el 1º periodo sin calefacción (izquierda) y 2º periodo con calefacción (derecha) por estratificación de alturas y tipo de aparato registrado

Figura IV.59: Valores promedio de temperatura superficial en el aplacado de granito registrado en la posición 3 (izquierda) y posición 4 (derecha) del 8 al 17 de marzo del 2016

Figura IV.60: Alzado interior de la fachada ventilada de granito norte. Datos de temperatura superficial de granito en [°C] el 3 de febrero del 2017 obtenidas con termómetro infrarrojos. Posición de los sensores de densidad de tasa de flujo de calor HFS2 y HFS3.

Figura IV.61: Estratificación de temperaturas superficiales de los sensores de flujo de calor HFS2, HFS3 (variación horizontal) izquierda y PT-100 (variación en altura), del 18 al 21 de enero del 2017

Figura IV.62: Temperaturas superficiales interiores y ambientales exterior e interior de la fachada ventilada de granito de la monitorización tercera 19 de enero al 6 de febrero del 2017.

Figura IV.63: Retardo de temperatura interior en la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

Figura IV.64: Valores de temperatura interior, temperatura exterior, densidad de tasa de flujo de calor interior y exterior en la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

Figura IV.65: Sentido del flujo según posición del sensor y parte del día. Verde qi y amarillo qe

Figura IV.66: Comportamiento de densidad de tasa de flujo de calor y temperatura exterior e interior en un día soleado (izquierda) y un día nublado (derecha) de la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

Figura IV.67: Mojado del sensor q1 exterior (línea naranja) en la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

Figura IV.68: Datos de humedad relativa, diferencia de temperatura y densidad de tasa de flujo de calor en la monitorización tercera 19 de enero al 3 de febrero del 2017

Figura IV.69: Alzado de posición de los sensores para la obtención de la transmitancia térmica, valor-U. Posiciones de los sensores (19 de enero al 7 de febrero del 2017)

Figura IV.70: Definición de planos y capas del cerramiento analizado según procedimiento ISO 9869:2014

Figura IV.71: Curva de transmitancia térmica en la columna izquierda (azul) y derecha (rojo) con corrección de masa según procedimiento del método de la media ISO 9869:2014

Figura IV.72: Posición de los dos sensores de temperatura superficial (PT-100) y los dos sensores de densidad de tasa de flujo de calor (HFS2 y HFS3) en la prueba realizada en enero y febrero del 2017

Figura IV.73: Valores horarios de densidad de tasa de flujo de calor [W/m^2] durante la monitorización y el periodo de test de comprobación

CAPÍTULO V

Figura V.1: Temperatura ambiental y de superficie en el granito en $^{\circ}\text{C}$ de los meses de enero, febrero y marzo. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.2: Temperatura ambiental y de superficie en el granito en $^{\circ}\text{C}$ de los meses de abril, mayo y junio. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.3: Temperatura ambiental y de superficie en el granito en $^{\circ}\text{C}$ de los meses de julio, agosto y septiembre. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.4: Temperatura ambiental y de superficie en el granito en $^{\circ}\text{C}$ de los meses de octubre, noviembre y diciembre. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.5: Posiciones de los resultados obtenidos de temperatura superficial en $^{\circ}\text{C}$

Figura V.6: Tendencia diurna de temperaturas superficiales en $^{\circ}\text{C}$ durante un día de invierno en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.7: Tendencia diurna de temperaturas superficiales en $^{\circ}\text{C}$ durante un día de primavera en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.8: Tendencia diurna de temperaturas superficiales en $^{\circ}\text{C}$ durante un día de verano en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.9: Tendencia diurna de temperaturas superficiales en $^{\circ}\text{C}$ durante un día de otoño en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.10: Temperatura ambiental y temperatura superficial exterior e interior del granito a lo largo del día 1 de febrero (izquierda) y 1 de mayo (derecha)

Figura V.11: Temperatura ambiental y temperatura superficial exterior e interior del granito a lo largo del día 1 de agosto (izquierda) y 1 de noviembre (derecha)

Figura V.12: Humedad relativa ambiental y de superficie en el granito en % de los meses de enero, febrero y marzo. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.13: Humedad relativa ambiental y de superficie en el granito en % de los meses de abril, mayo y junio. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.14: Humedad relativa ambiental y de superficie en el granito en % de los meses de julio, agosto y septiembre. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.15: Humedad relativa ambiental y de superficie en el granito en % de los meses de octubre, noviembre y diciembre. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.16: Posiciones de los resultados obtenidos de humedad relativa en % y foto de un aplacado de la fachada.

Figura V.17: Tendencia diurna de humedades relativas en % durante un día de invierno en las cinco posiciones (1-5) de la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.18: Tendencia diurna de humedades relativas en % durante un día de primavera en las cinco posiciones (1-5) de la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.19: Tendencia diurna de humedades relativas en % durante un día de verano en las cinco posiciones (1-5) de la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.20: Tendencia diurna de humedades relativas en % durante un día de otoño en las cinco posiciones (1-5) de la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.21: Valores horarios del día 1 de mayo y 1 de agosto de la temperatura y humedad relativa superficial interior y exterior del granito

Figura V.22: Valores horarios del día 1 de noviembre y 1 de febrero de la temperatura y humedad relativa superficial interior y exterior del granito

Figura V.23: Contenido total de agua en Kg/m^2 de la fachada ventilada de granito en A Coruña. Simulación realizada durante 5 años. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.24: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación de todas las zonas climáticas para la condición del **cerramiento sin aislamiento FVG0S**

Figura V.25: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación de todas las zonas climáticas para la condición del **cerramiento aislamiento de poliuretano de 3cm FVG0C3**

Figura V.26: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación de todas las zonas climáticas para la condición del **cerramiento aislamiento de poliuretano de 9cm FVG0C9**

Figura V.27: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación de todas las zonas climáticas para la condición del **cerramiento aislamiento de poliuretano de 11cm FVG0C11**

Figura V.28: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación de todas las zonas climáticas para la condición del **cerramiento aislamiento de poliuretano de 15cm FVG0C15**

Figura V.29: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación en la zona climática A3 Málaga para todas las condiciones de cerramiento.

Figura V.30: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación en la zona climática B3 Palma de Mallorca para todas las condiciones de cerramiento.

Figura V.31: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación en la zona climática C1 Coruña para todas las condiciones de cerramiento.

Figura V.32: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación en la zona climática C2 Barcelona para todas las condiciones de cerramiento.

Figura V.33: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el año de simulación en la zona climática D3 Madrid para todas las condiciones de cerramiento.

Figura V.34: Valores U de transmitancia térmica del 1º año y del 5º año entre la zona climática con mayor capacidad de secado del cerramiento (Madrid) y la que menos (A Coruña) para un espesor de aislamiento de poliuretano de 3cm.

Figura V.35: Diferencia de valores U (W/m^2K) de transmitancia térmica (decremento en positivo e incremento en negativo) en el 5º año entre la zona climática con menor capacidad de secado del cerramiento (A Coruña) y la que más (Madrid) para un espesor de aislamiento de poliuretano de 3cm.

Figura V.36: Valores U (W/m^2K) de transmitancia térmica en el 1º, 5º y 20º año en la zona climática de A Coruña (C1) para un espesor de aislamiento de poliuretano de 3cm.

Figura V.37: Comportamiento del contenido de agua del granito en las distintas zonas climáticas para un espesor de aislamiento de poliuretano de 3cm durante el último año de simulación. Wufi Pro 5.3

Figura V.38: Variación del contenido de agua Kg/m^2 en la cámara de espesor 5cm (poliuretano 3cm) durante el primer año según las zonas climáticas

Figura V.39: Variación del contenido de agua Kg/m^2 en la cámara de espesor 5cm (poliuretano 9cm) durante el primer año según las zonas climáticas

Figura V.40: Variación del contenido de agua Kg/m^2 en la cámara de espesor 5cm con aislamiento de poliuretano de 3cm y 9cm durante el primer año en la zona climática de A Coruña

Figura V.41: Variación del contenido de agua Kg/m^2 en la cámara de espesor 5cm con aislamiento de poliuretano de 3cm y 9cm durante el primer año en la zona climática de Madrid

Figura V.42: Mapa de precipitaciones medias anuales en Europa. Agencia Europea Medioambiental (EEA). Fuente: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/average-annual-precipitation>

Figura V.43: Contenido de agua en Kg/m^3 en el muro de hormigón de la fachada ventilada durante los cinco años de simulación según diferentes cuantías lluvia incidente ASHRAE 160P. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.44: Valores de transmitancia térmica dinámica, valor U , durante cinco años según diferentes cuantías de lluvia incidente ASHRAE 160P. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.45: Valor de transmitancia térmica mensual del último año de simulación de las diferentes condiciones de lluvia incidente según ASHRAE

Figura V.46: Diferencia porcentual del valor de transmitancia térmica mensual del último año de simulación de las diferentes condiciones de lluvia incidente según ASHRAE

Figura V.47: Densidad de tasa de flujo de calor en W/m^2 en el lado frío-sup ext (amarillo) y en el lado caliente (rojo) del cerramiento de fachada ventilada de granito en A Coruña durante un año de simulación con la herramienta Wufi Pro 5.3

Figura V.48: Diferencia de densidad de tasa de flujo de calor en W/m^2 entre el lado frío sup-ext y el caliente y densidad de flujo de masa de humedad en g/m^2 s del año de monitorización del cerramiento de fachada ventilada de granito en A Coruña con la herramienta Wufi Pro 5.3

Figura V.49: Densidad de flujo de calor en W/m^2 en el lado exterior (azul-negro) y en el lado caliente (rojo) del cerramiento de fachada ventilada de granito en A Coruña durante cinco años de simulación con la herramienta Wufi Pro 5.3. Opción con calor latente.

Figura V.50: Diferencia de densidad de flujo de calor en W/m^2 del lado caliente (rosa-rojo) y densidad de flujo de masa de humedad (azul) en g/m^2 s durante cinco años de monitorización del cerramiento de fachada ventilada de granito en A Coruña con la herramienta Wufi Pro 5.3. Opción con calor latente

Figura V.51: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante los cinco años en todas las simulaciones con distintos espesores de aislamiento de poliuretano. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.52: Contenido total de agua en Kg/m^2 durante el último año en todas las simulaciones con distintos espesores de aislamiento de poliuretano. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.53: Contenido de agua en Kg/m^3 en la cámara de aire durante los cinco años en todas las simulaciones con distintos espesores de poliuretano. Wufi Pro 5.3

Figura V.54: Contenido de agua en Kg/m^3 en la cámara de aire durante el último año de simulación con distintos espesores de poliuretano. Wufi Pro 5.3

Figura V.55: Contenido de agua en Kg/m^3 en el poliuretano durante los cinco años en todas las simulaciones con distintos espesores de aislamiento de poliuretano. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.56: Contenido de agua en Kg/m^3 en el poliuretano durante el último año en la simulaciones con distintos espesores de aislamiento de poliuretano. Wufi Pro 5.3

Figura V.57: Diagrama de barras del incremento porcentual del valor U ($\text{W/m}^2\text{K}$) entre la U en seco y la U con contenido del 80% de humedad relativa según espesores de aislamiento. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.58: Valores de U ($\text{W/m}^2\text{K}$) transmitancia térmica mensual (excepto agosto) durante el primer año de los distintos espesores de aislamiento analizados. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.59: Incremento porcentual del valor U ($\text{W/m}^2\text{K}$) entre la media de la U mensual con respecto a la U en seco y entre la media de la U mensual con respecto a la U al 80% de HR, según los distintos espesores de aislamiento analizados en la localización C1 A Coruña. Wufi Pro 5.3

Figura V.60: Valores de transmitancia térmica estacionaria U seco, U 80 y transmitancia térmica U mensual para la simulación sin aislamiento térmico. Wufi Pro 5.3

Figura V.61: Valores de transmitancia térmica estacionaria U seco, U 80 y transmitancia térmica U mensual para la simulación con aislamiento térmico de 3cm de poliuretano, caso cumplimiento CT-79 en localización A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.62: Contenido total de agua en Kg/m^2 según espesores de la cámara de aire en cm durante los cinco años de simulación. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.63: Contenido total de agua en el cerramiento durante un año suponiendo diferentes espesores de la cámara. Resultados de simulación Wufi Pro 5.3

Figura V.64: Valores de transmitancia térmica mensuales durante los cinco años simulados. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.65: Reducción mensual en porcentaje en el último año de simulación entre el valor de transmitancia térmica del espesor de la cámara 1,5cm con respecto al espesor de la cámara de 9cm. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.66: Reducción mensual en porcentaje en el último año de simulación entre el valor de transmitancia térmica del espesor de la cámara de 5cm y 9cm con respecto al espesor de la cámara de 2cm. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.67: Contenido total de agua en Kg/m^2 a lo largo de los cinco años de simulación del mayor intercambio de aire en relación a la cámara sin ventilar. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.68: Contenido total de agua en el cerramiento en un año variando las tasas de renovación de aire. Resultados Wufi Pro 5.3.

Figura V.69: Contenido de agua en la cámara durante un año suponiendo renovaciones de aire. Resultados de simulación Wufi Pro 5.3

Figura V.70: Valores de transmitancia térmica de los diferentes ratios de velocidad de aire. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.71: Variación en porcentaje % de la transmitancia térmica $U \text{ W/m}^2\text{K}$ entre el supuesto de ratio de intercambio de aire más bajo 10 con respecto al más alto 200 en el último año de simulación. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.72: Contenido de agua en Kg/m^3 en el granito durante el último año de simulación según espesores diferentes de aplacados. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.73: Valores de transmitancia térmica mensual en $\text{W/m}^2\text{K}$ de la fachada ventilada del último año de simulación según diferentes espesores de aplacado. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.74: Forma de modelado de la mampostería de granito para la introducción en la simulación de Wufi Pro 5.3
Espesor total: 46 cm

Figura V.75: Contenido total de agua del cerramiento tradicional en Galicia Kg/m^2 (mampostería-sillería de granito) durante 30 años. Resultados obtenidos Wufi Pro 5.3

Figura V.76: Contenido total de agua de un muro de hormigón de 24cm durante 30 años. Resultados obtenidos Wufi Pro 5.3

Figura V.77: Contenido de agua en Kg/m^3 en la capa soporte de hormigón de la fachada ventilada de 3cm de espesor de aislamiento. Simulación durante 30 años. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.78: Resultado del contenido total de agua en Kg/m^2 de la fachada ventilada con ladrillo macizo con 3cm de aislamiento y con 30cm de aislamiento. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.79: Contenido total de agua Kg/m^2 de la fachada ventilada con 3cm de espesor de poliuretano. Simulación de 30 años. Cond iniciales 80%. Resultado Wufi Pro 5.3

Figura V.80: Contenido total de agua de la fachada ventilada con 3cm de espesor de poliuretano. Simulación de 30 años. Cond iniciales 30% HR. Resultado Wufi Pro 5.3

Figura V.81: Balance de agua del cerramiento con 30cm de espesor de poliuretano. HR=80%. Simulación de 30años Resultado Wufi Pro 5.3

Figura V.82: Balance de agua del cerramiento con 30cm de espesor de poliuretano. HR=30%. Simulación de 30años Resultado Wufi Pro 5.3

Figura V.83: Contenido total de agua a lo largo de un año de PU y XPS con posiciones interior y exterior del aislamiento de la fachada ventilada de granito. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.84: Contenido total de agua a lo largo de un año de PU y XPS en posición interior del aislamiento de la fachada ventilada de granito. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.85: Contenido total de agua a lo largo de un año de PU y XPS en posición exterior del aislamiento de la fachada ventilada de granito. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.86: Contenido de agua del último año de simulación de los cuatro cerramientos analizados que cumplen con GI 5 del C.T.E. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura V.87: Resultado de la transmitancia térmica mensual de los cinco años de simulación para los cuatro cerramientos analizados que cumplen con GI 5 del C.T.E. Resultados Wufi Pro 5.3

CAPÍTULO VI

Figura VI.1: Mapa conceptual del proceso seguido en el desarrollo de las pruebas de verificación y contraste

Figura VI.2: Diferentes formas de contacto ensayadas durante las pruebas de monitorización y contraste con el sensor de densidad de tasa de flujo de calor hfs-4. Caso a: funda de plástico y cinta armada color gris. Caso b: contacto irregular con cinta a doble cara o silicona. Caso c: maximización de la superficie de contacto con silicona

Figura VI.3: Instrumentación del sistema-kit y posiciones de los sensores de temperatura superficial con el sistema-kit testo 435-2

Figura VI.4: Instrumentación para el método de las tres temperaturas TBM con aparato de Testo 435-2 para la obtención del valor U

Figura VI.5: Segundo ensayo de transmitancia térmica obtenida por el método de las diferencias de temperaturas TBM con el aparato testo 435-2 el día 18-19 de septiembre del 2016

Figura VI.6: Instrumentación para el método de las tres temperaturas TBM con aparato de datalogger DT-85 para la obtención del valor U

Figura VI.7: Instrumentación del procedimiento con el datalogger para la recogida de la transmitancia térmica, valor-U

Figura VI.8: Contenido total de agua del cerramiento en el último año de simulación con dos tipos de propiedades diferentes de granito. Resultados Wufi Pro 5.3.

Figura VI.9: Contenido total de agua del cerramiento en el último año de simulación con tres tipos de propiedades diferentes de poliuretano. Resultados Wufi Pro 5.3.

Figura VI.10: Contenido total de agua del cerramiento en el último año de simulación con tres tipos de propiedades diferentes de hormigón. Resultados Wufi Pro 5.3.

Figura VI.11: Valores horarios de temperatura (°C) y humedad relativa (%) del mes de enero. Valores en discontinuo de temperatura y humedad relativa exterior del software *meteonorm*. Valores continuos de temperatura y humedad relativa del exterior y de la cámara recogidos de la monitorización in situ enero 2009.

Figura VI.12: Valores horarios de temperatura (°C) y humedad relativa (%) del mes de abril. Valores en discontinuo de temperatura y humedad relativa exterior del software *meteonorm*. Valores continuos de temperatura y humedad relativa del exterior y de la cámara recogidos de la monitorización in situ abril 2009.

Figura VI.13: Valores horarios de temperatura (°C) y humedad relativa (%) del mes de julio. Valores en discontinuo de temperatura y humedad relativa exterior del software *meteonorm*. Valores continuos de temperatura y humedad relativa del exterior y de la cámara recogidos de la monitorización in situ julio 2008.

Figura VI.14: Valores horarios de temperatura (°C) y humedad relativa (%) del mes de octubre. Valores en discontinuo de temperatura y humedad relativa exterior del software *meteonorm*. Valores continuos de

temperatura y humedad relativa del exterior y de la cámara recogidos de la monitorización in situ octubre 2008.

Figura VI.15: Dispersión de valores de temperatura de la cámara monitorizada y temperatura de la cámara simulada durante el año 2008-2009

Figura VI.16: Cámara de aire. Valores de humedad relativa en la cámara simulada (azul) y monitorizada (rojo) desde mayo 2008 a mayo 2009

Figura VI.17: Cámara de aire. Valores de humedad absoluta en g/m^3 en simulación (azul) y monitorización (rojo) durante el año de monitorización (horas)

Figura VI.18: Diferencia de presiones de vapor del exterior y de la cámara casi cerrada (Pve-Pvc) mensuales obtenidos de valores monitorizados *in situ* (naranja) y del procedimiento UNE-EN 13788 (violeta)

Figura VI.19: Datos de temperatura exterior e interior y densidad de tasa de flujo de calor interior simulado con Wufi Pro 5.3 y obtenido experimentalmente en las dos posiciones 2 y 3. Fachada ventilada de granito norte. Monitorización del 21 de enero al 3 de febrero del 2017

Figura VI.20: Valores de estadística descriptiva de las densidades de tasa de flujo de calor simuladas y experimentales en la monitorización tercera de enero a febrero del 2017

Figura VI.21: Valores de estadística descriptiva de las densidades de tasa de flujo de calor simuladas y experimentales en la monitorización tercera de enero a febrero del 2017

Figura VI.22: Comparativa de flujos de calor por tipos de cerramientos del 2 al 11 de octubre del 2016 en ensayo octavo

Figura VI.23: Valores de transmitancia térmica estacionaria U seco, U 80%HR, transmitancia térmica U mensual y transmitancia térmica mensual promedio Uprom para la simulación con aislamiento térmico de 3cm de poliuretano. Fachada ventilada de granito de orientación norte en A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Figura VI.24: Comparativa de pérdidas de energía a partir de la transmitancia térmica dependiendo del valor U de cálculo o de monitorización de la fachada ventilada de granito orientada al norte en A Coruña

CAPÍTULO VII

Figura VII.1: Comportamiento de la densidad de flujo de calor y del movimiento de presión de vapor en el cerramiento de fachada ventilada de granito analizada en condiciones de invierno

Figura VII.2: Posibles movimientos de humedad en el hormigón hacia el interior de la sala

Figura VII.3: Posible explicación del fenómeno de elevación de la temperatura superficial interior del cerramiento

Figura VII.4: Partes de la fachada ventilada analizada. a. Hoja exterior, b. cámara de aire, c. aislamiento y d. hoja interior

INDICE DE TABLAS

CAPITULO II

Tabla II.1: Estacionalidad de las rachas extremas de viento (velocidad y dirección) según los meses del año en la estación de Aemet de A Coruña ciudad. Adaptado de Martí Ezpeleta (1998)

Tabla II.2: Temperatura de diseño interior. (ASHRAE 160P)

Tabla II.3: Neno Pascoa (2012) Clasificación MERUC y requisitos para la atribución del certificado CSTBat (según Veiga 2001^a y Biga & Abrantes (2003) citados en Flores Colen (2009)

Tabla II.4: Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en $\text{m}^2\text{K/W}$. Tomado de CTE DA DB HE-1

Tabla II.5: Valor de h_e para el cálculo de la transmitancia térmica. ASHRAE Handbook of Fundamentals en Hens, 2012

Tabla II.6: Cuadro comparativo de materiales aislantes para una fachada. (Sanchez-Ostiz, 2011)

Tabla II.7: Clasificación según sistema de sujeción de las fachadas ventiladas. (EOTA, 2011)

Tabla II.8: Materiales para el revestimiento de fachadas y sus fijaciones según clasificación ETAG 034 de tipos de fachadas ventiladas. (EOTA, 2011)

Tabla II.9: Variables higrotérmicas en el cerramiento (Adaptado de Mao, 2008)

Tabla II.10: Tabla 2.7. Condiciones de las soluciones de fachada, (C.T.E. DB HS-1, 2013)

Tabla II.11: Condiciones del sistema constructivo de fachada. (Información extraída del C.T.E. y Catálogo de Elementos Constructivos)

Tabla II.12: Ficha 4.2.8 Fabrica con revestimiento discontinuo, con cámara de aire ventilada, aislamiento por el exterior y ficha 4.2.10 Fachada ligera ventilada. (Catálogo de Elementos Constructivos, 2010)

Tabla II.13: Parámetros cuantificables de las prestaciones exigidas en el C.T.E.

Tabla II.14: Parámetros característicos de la envolvente térmica. Valores orientativos. (CTE DB HE 1 Apéndice E)

Tabla II.15: Resumen del procedimiento de cálculo según la opción simplificada (Zabalza et al, 2007)

Tabla II.16: Tabla resumen de la clasificación de la cámara de aire según superficie de aberturas y documento referenciado

Tabla II.17: Cálculo de transmitancia térmica en el caso de la fachada con cámara muy ventilada

Tabla II.18: Cálculo de transmitancia térmica en el caso de la fachada con cámara débilmente ventilada

Tabla II.19: Cálculo de transmitancia térmica en el caso de la fachada con cámara sin ventilar

Figura II.20: Tabla comparativa de las norma en materia de protección contra la humedad de Gran Bretaña y España (Pérez Bella, 2012)

Tabla II.21: Tabla 4 de recomendación de zonas de exposición máximas para muros de cerramiento aislados. (Approved Document C, 2012)

Tabla II.22: Severidad de carga ambiental indicada por el índice de humedad (MI)

Tabla II.23: Datos del parámetro del índice de Humedad MI para A Coruña (España) y Vancouver (Columbia Británica, Canadá)

Figura II.24: Categorías esperadas de comportamiento en cerramientos en función de los niveles de exposición a la humedad

Tabla II.25: Valores nominales de resistencia térmica para la localización de Vancouver (Columbia Británica y Vancouver Canadá)

Tabla II.26: Datos de R máximos en todas las zonas climáticas de Estados Unidos para los muros opacos sobre rasante. (IECC, 2012)

Tabla II.27: Características de tipos de cerramientos ensayados. (Pisello et al, 2014)

CAPÍTULO III

Tabla III.1: Variables monitorizadas in situ en la fachada ventilada de granito del Edificio de Departamentos de la ETSAC, Universidad de A Coruña en febrero del 2016. (*) Medida indirecta

Tabla III.2: Resumen de los dispositivos utilizados en la recogida de las variables en la monitorización in situ durante el mes de febrero y marzo del 2016

Tabla III.3: Valores de temperatura normales* 1971-2000 y recogidos en la monitorización higrotérmica** mayo 2008-abril 2009. A Coruña (España)

Figura III.4: Valores de humedad relativa normales* 1971-2000 y recogidos en la monitorización higrotérmica** mayo 2008-abril 2009. A Coruña (España)

Tabla III.5: Información de los softwares de modelos higrotérmicos comerciales (Delgado et al, 2010)

Tabla III.6: Mecanismos considerados y no considerados en el ensayo WUFI Pro 5.3

Tabla III.7: Propiedades básicas y complementarias especificadas en WUFI Pro 5.3 y utilizadas en los cálculos de simulación.

Tabla III.8: Propiedades para definir en la superficie interior y exterior del cerramiento

Tabla III.9: Datos suministrados en el archivo de Meteonorm .WAC durante un año para incorporar al programa WUFI Pro 5.3.

Tabla III.10: Variación de valores según referencias

Tabla III.11: Incertidumbres de valores U extraídos in situ y sus acciones correctoras (Ficco et al, 2015)

CAPÍTULO IV

Tabla IV.1: Tendencia de temperaturas ambientales del exterior [°C], cámara e interior durante un día de primavera 16/05/2008 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

Tabla IV.2: Tendencia de temperaturas ambientales del exterior [°C], cámara e interior durante un día de verano 01/08/2008 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

Tabla IV.3: Tendencia de temperaturas ambientales del exterior [°C], cámara e interior durante un día de otoño 01/11/2008 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

Tabla IV.4: Tendencia de temperaturas ambientales del exterior [°C], cámara e interior durante un día de invierno 01/02/2009 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

Tabla IV.5: Tendencia de humedades relativas ambientales del exterior [%], cámara e interior durante un día de primavera 16/05/2008 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

Tabla IV.6: Tendencia de humedades relativas ambientales del exterior [%], cámara e interior durante un día de verano 01/08/2008 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

Tabla IV.7: Tendencia de humedades relativas ambientales del exterior [%], cámara e interior durante un día de otoño 01/11/2008 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

Tabla IV.8: Tendencia de humedades relativas ambientales del exterior [%], cámara e interior durante un día de otoño 01/02/2009 en la fachada ventilada de granito. Monitorización in situ

Tabla IV.9: Valores promedio de junio del 2008 a marzo 2009 de la diferencia de presión de vapor de agua [Pa] y número de horas del sentido del flujo de vapor de agua

Tabla IV.10: Horas totales monitorizadas (7990h) y porcentaje de sentido de flujo de vapor de agua entre el exterior y la cámara (Pve – Pvc) y entre la cámara y el interior (Pvc – Pvi). Mayo 2008 a abril 2009

Tabla IV.11: Valor promedio de diferencia de presión de vapor, horas totales monitorizadas (671,75h) y porcentaje de sentido de flujo de vapor de agua entre el exterior y la cámara (Pve – Pvc) y entre la cámara y el interior (Pvc – Pvi). Días del 19 febrero al 17 marzo 2016

Tabla IV.12: Valores promedio del 19 febrero a 17 marzo del 2009 y 2016 de la diferencia de presión de vapor de agua [Pa] y número de horas del sentido del flujo de vapor de agua

Tabla IV.13: Valores descriptivos de la temperatura interior y temperatura exterior de la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

Tabla IV.14: Valores descriptivos de densidad de tasa de flujo de calor interior y exterior de la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

Tabla IV.15: Coeficientes de correlación de Pearson de las diferentes variables analizadas. Salida SPSS statistics

Tabla IV.16: Valores descriptivos de la humedad relativa interior y exterior de la monitorización tercera de la fachada ventilada de granito

Tabla IV.17: Ecuaciones de regresión lineal estandarizadas de las variables dependientes q_e y q_i de la monitorización tercera del 19 de enero al 6 de febrero del 2017 en periodo de lluvia

Tabla IV.18: Ecuaciones de regresión lineal estandarizadas de las variables dependientes q_e y q_i de la monitorización tercera del 19 de enero al 6 de febrero del 2017 en periodo sin lluvia

Tabla IV.19: Ecuaciones de regresión lineal estandarizadas de las variables dependientes q_e y q_i de la monitorización tercera del 19 de enero al 6 de febrero del 2017 en la totalidad del periodo

Tabla IV.20: Propiedades de cada capa de material componente de la fachada para el cálculo de corrección por masa

Tabla IV.21: Factores de masa térmica obtenidos según apartado 7.2.2 de la ISO 9869:2014

Tabla IV.22: Procedimiento para el cálculo de los valores U corregidos (U') según ISO 9869:2014

Tabla IV.23: Transmitancias térmicas obtenidas de la monitorización del cerramiento

CAPÍTULO V

Tabla V.1: Temperatura en °C en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de invierno en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.2: Temperatura en °C en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de primavera en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.3: Temperatura en °C en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de verano en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.4: Temperatura en °C en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de otoño en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.5: Humedad relativa % en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de invierno en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.6: Humedad relativa % en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de primavera en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.7: Humedad relativa % en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de verano en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.8: Humedad relativa % en las horas y posiciones marcadas en la figura durante un día de otoño en la fachada ventilada de granito de A Coruña. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.9: Zonas climáticas elegidas según archivos climáticos disponibles en el programa Wufi Pro 5.3

Tabla V.10: Resumen de las simulaciones efectuadas según las zonas climáticas y espesores de aislamientos

Tabla V.11: Simulaciones efectuadas según orientación de la fachada. Resultados de contenido total de agua en Kg/m² Wufi Pro 5.3

Tabla V.12: Modelos y parámetros elegidos para la incorporación en el estudio de sensibilidad según Sting Leal (2012)

Tabla V.13: Simulaciones efectuadas en el programa WUFI Pro 5.3 variando parámetros de lluvia incidente

Tabla V.14: Resultados de contenido total de agua en Kg/m² del cerramiento al principio y final de los cinco años suponiendo diferentes condiciones de lluvia incidente. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.15: Contenido de agua en Kg/m³ al inicio y final de la simulación según parámetros de lluvia incidente. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.16: Simulaciones de Fachada Ventilada de Granito con variaciones según el espesor del aislamiento térmico

Tabla V.17: Valores U transmitancia térmica (W/m²K) límite según zona climática definida en CTE DB HE-1 (2013)

Tabla V.18: Resumen del contenido total de agua en Kg/m² según las simulaciones realizadas. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.19: Valores de U transmitancia térmica (W/m²K) en estado seco y al 80% de Humedad relativa obtenidos por el programa Wufi Pro 5.3

Tabla V.20: Valores iniciales y finales del contenido total de agua Kg/m² obtenidos en la simulación. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.21: Valores de contenido de agua en Kg/m³ en la cámara de aire de la fachada ventilada según diferentes espesores de la cámara al principio y al final de la simulación. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.22: Parámetros elegidos para la variación de intercambio de aire y su incorporación en el estudio de sensibilidad

Tabla V.23: Simulaciones efectuadas en el programa WUFI Pro 5.3 variando parámetros de intercambio de aire en la cámara

Tabla V.24: Contenido total de agua al principio y al final de los cinco años de las simulaciones efectuadas. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.25: Contenido de agua en la cámara de aire en Kg/m³ según ratios de intercambio de aire al inicio y al final de la simulación. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.26: Resultados del contenido total de agua en Kg/m² al inicio y al final de las simulaciones realizadas. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.27: Resultados de la simulación al inicio y al final del contenido total de agua Kg/m² con tres soportes diferentes. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.28: Resultados del contenido total de agua en Kg/m² de la fachada ventilada de aislamiento de 3cm a lo largo del tiempo, según dos contenidos de humedad relativa inicial H=80% y 30%. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.29: Resultados del contenido total de agua en Kg/m² de la fachada ventilada de aislamiento de 30cm a lo largo del tiempo, según dos contenidos de humedad relativa inicial H=80% y 30%. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.30: Resultados del contenido total de agua en Kg/m² de la fachada ventilada con aislamiento de 3 y 30cm a lo largo del tiempo, según dos contenidos de humedad relativa inicial H=80%. Resultados Wufi Pro 5.3

Tabla V.31: Listado de ejemplos de tipos de cerramiento de fachada con grado de impermeabilidad 5

Tabla V.32: Cerramiento de fachadas elegidas del catálogo de elementos constructivos del C.T.E. v. marzo 2010 con el cumplimiento del Grado de Impermeabilidad 5 (C.T.E. DB HS-1)

Tabla V.33: Propiedades de los materiales componentes de los cerramientos. Fuente: Catálogo de elementos constructivos del C.T.E. V. marzo 2010

Tabla V.34: Resumen de las simulaciones realizadas con Wufi Pro 5.3.

CAPÍTULO VI

Tabla VI.1: Ecuaciones de regresión lineal de las variables dependientes q_e y q_i

Tabla VI.2: Resumen de las verificaciones realizadas con ensayos y/o monitorizaciones in situ

Tabla VI.3: Propiedades de dos tipos de granito según bases de datos diferentes

Tabla VI.4: Propiedades de tres tipos de poliuretano según bases de datos diferentes

Tabla VI.5: Propiedades de tres tipos de hormigón según bases de datos diferentes

Tabla VI.6: Variación del contenido total de agua en las simulaciones efectuadas. Wufi Pro 5.3. (Verde: simulación con los mismos parámetros)

Tabla VI.7: Tipos de cerramientos analizados en la figura del flujo de calor

Tabla VI.8: Tabla comparativa de los resultados obtenidos en los ensayos y cálculos realizados de transmitancia térmica de la fachada ventilada de granito orientada al norte en A Coruña.